



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2023 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

# **Aktiv trykkforvaltning i Bergen kommune**

Active pressure management in the municipality of  
Bergen

**Eivind Henriksen Zahl**  
Vann- og miljøteknikk



# Forord

Det å skrive en masteroppgave har vært en svært givende, og samtidig krevende prosess.

I dette forordet ønsker jeg å takke alle som har hjulpet meg i løpet av denne prosessen. Først og fremst vil jeg takke min veileder, Vegard Nilsen for sin uvurderlige støtte og veiledning gjennom hele prosessen. Jeg vil også takke min biveileder Sam Alaya i Bergen Vann og Tor-Arne Torsvik som har hjulpet meg og alltid besvart mine spørsmål med stor entusiasme og engasjement.

Jeg vil også rette en spesiell takk til min familie, medstudenter og venner for deres uendelige støtte og oppmuntring i løpet av denne tiden. Deres støtte har vært en konstant motivasjon for meg.

Til slutt vil jeg dedikere denne oppgaven til alle som har vært inspirert og motivert av min innsats. Jeg håper denne oppgaven vil være en kilde til kunnskap og inspirasjon for alle som leser den.

Takk til alle som har vært en del av denne reisen.

Ås 06.06.2023

---

Eivind Zahl



## Sammendrag

Deler av forsyningsvannet som behandles for å distribueres til forbrukere går tapt på veien grunnet lekkasjer. I denne oppgaven er det sett på i hvilken grad trykksenkning kan benyttes som tiltak for å redusere lekkasjene i to forsyningssoner i Bergen kommune, og hvor store besparelser dette kan medføre.

Basert på resultatene i oppgaven kan det være økonomisk gunstig for Bergen kommune å benytte seg av forbruksmodulert trykkstyring. Tall fra beregninger basert på hydraulisk modell i MIKE+ viser at det for en enkelt forsyningszone med 9380 PE kan spares omtrent 1,2 millioner NOK i løpet av en 10-års periode ved å senke trykket i sonen med 6 meter ved hjelp av forbrukstyrt trykk.

I tillegg til bruk av hydraulisk modellering har det blitt satt opp et system for denne typen trykkstyring i samme forsyningszone, for å se om samme resultater kan oppnås i virkeligheten. Data fra dette prosjektet viser ikke en reduksjon i lekkasjer, og trykket reduseres ikke like mye som ønsket. Det kan være flere årsaker til dette, men det kan trekkes frem at perioden med datainnsamling har vært kort og derfor kanskje ikke representativ. Basert på resultatene fra denne studien er det ikke mulig å si om prosjektet er lønnsomt.



## Summary

Parts of the treated water for distribution to consumers are lost along the way due to leaks. This study examines to what extent pressure reduction can be used as a measure to reduce leaks in two supply zones in the Municipality of Bergen and the potential cost savings associated with it.

Based on the results of the study, it may be financially beneficial for the Municipality of Bergen to utilize consumption-based pressure control. Figures from calculations based on a hydraulic model in MIKE+ show that for a single supply zone with 9380 Population Equivalent (PE), approximately 1.2 million NOK can be saved over a 10-year period by reducing the pressure in the zone by 6 meters using consumption-driven pressure control.

In addition to hydraulic modeling, a system for this type of pressure control has been implemented in the same supply zone to see if similar results can be achieved in reality. Data from this project does not show a reduction in leaks, and the pressure is not reduced as much as desired. There may be several reasons for this, but it can be noted that the data collection period has been short and therefore may not be representative. Based on the results of this study, it is not possible to determine if the project is profitable.





# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Summary . . . . .	v
Innhold . . . . .	vii
Figurer . . . . .	x
Tabeller . . . . .	xi
Forkortelser . . . . .	xiii
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstilling . . . . .	2
<b>2 Bakgrunn</b>	<b>3</b>
2.1 Lekkasje . . . . .	3
2.2 Trykk og lekkasje: N1-eksponenten . . . . .	8
2.3 Trykkforvaltning . . . . .	10
2.3.1 Trykkforvaltning og krav til sikkerhet . . . . .	11
2.4 Kost-nytte ved aktiv trykkforvaltning . . . . .	11
2.4.1 Økonomisk optimalt lekkasjenivå . . . . .	12
2.5 Tidligere studier: kost-nytte . . . . .	13
2.5.1 Norske funn . . . . .	14
2.5.2 Internasjonale funn . . . . .	14
<b>3 Metode</b>	<b>17</b>
3.1 Case-studie i Bergen kommune . . . . .	17
3.2 Oppsett av modell i MIKE+ . . . . .	17
3.2.1 Beregning av lekkasje ved hjelp av minste nattforbruk . . . . .	20
3.2.2 Trykkavhengig lekkasje- Emittere . . . . .	21
3.2.3 Kritiske trykkpunkter . . . . .	21
3.3 Simuleringer av ulike trykkstyringsregimer i MIKE+ . . . . .	22
3.3.1 Forbruksmodulert trykk med kritisk node . . . . .	22
3.3.2 Følsomhetsanalyse . . . . .	23

3.4	Dynamisk trykkstyring med i2O . . . . .	23
3.5	Kost-nytte-analyse . . . . .	25
3.5.1	Følsomhetsanalyse . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>29</b>
4.1	Beregninger av lekkasje-MNF . . . . .	29
4.2	Simuleringer i MIKE+ . . . . .	30
4.3	Trykksenkning i sone SO01 . . . . .	31
4.3.1	Følsomhetsanalyse . . . . .	34
4.4	Trykksenkning i sone SO14 . . . . .	36
4.4.1	Følsomhetsanalyse . . . . .	38
4.5	Kostnadsanalyse . . . . .	39
4.6	Følsomhetsanalyse . . . . .	41
4.6.1	Beregninger for 3 ulike scenarier . . . . .	42
4.7	Resultater fra i2O . . . . .	42
4.7.1	Nåverdiberegning for i2O . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>49</b>
	<b>Referanser</b>	<b>51</b>

# Figurer

2.1	Vannbalanse-modell fra IWA (Lambert, 2002) . . . . .	4
2.2	4 metoder for å redusere tap fra lekkasjer (Lambert, 2002) . . . . .	5
2.3	Nattforbruk (Hamilton og McKenzie, 2014) . . . . .	7
2.4	Ulike lekkasjetyper(Thornton mfl., 2008) . . . . .	8
2.5	Lekkasje og trykk (Thornton og Lambert, 2005) . . . . .	9
2.6	Beregnete og observerte verdier for N1 (Thornton og Lambert, 2005) . .	10
2.7	Kostnader ved SELL (Malm mfl., 2020) . . . . .	13
2.8	Kostnadsreduskjon ved normalt forbruk (Creaco mfl., 2017) . . . . .	15
2.9	Kostnadsreduskjon ved maksimalt forbruk (Creaco mfl., 2017) . . . . .	15
3.1	Forsyningssone SO01 og SO14, Bergen Vann . . . . .	18
3.2	Forsyningssone SO14, Bergen Vann . . . . .	19
3.3	Forsyningssone SO01, Bergen Vann . . . . .	20
3.4	Fast vs. dynamisk trykkstyring (Gori, 2015) . . . . .	22
3.5	System fra i2O (Gori, 2015) . . . . .	24
3.6	Trykkreduksjonsventil med aktuator fra i2O . . . . .	25
4.1	Forbruk observert og i modell SO01 før aktiv trykkstyring . . . . .	31
4.2	Forbruk observert og i modell SO14 før aktiv trykkstyring . . . . .	31
4.3	Forbruksmodulert kurve i SO01 . . . . .	33
4.4	Endring i forbruk SO01 . . . . .	33
4.5	Trykk ved kritisk node i modell SO01 . . . . .	34
4.6	Endring i forbruk med opprinnelig N1-verdi . . . . .	35
4.7	Endring i forbruk med høyere N1-verdi . . . . .	35
4.8	Forbruksmodulert kurve SO14 . . . . .	37
4.9	Endring i forbruk SO14 . . . . .	37
4.10	Trykk ved kritisk node i modell SO14 . . . . .	38
4.11	Forbruk ved ulike verdier av N1 . . . . .	39
4.12	Trykk ved kritisk node før og etter nattsenkning . . . . .	44
4.13	Trykk ved kritisk node før og etter i2O . . . . .	44
4.14	Forbruk før og etter i2O . . . . .	45



# Tabeller

3.1	Minimalt nattforbruk, (Hamilton og McKenzie, 2014) . . . . .	21
3.2	Variable kostnader vannforsyning . . . . .	26
4.1	Data for beregninger . . . . .	29
4.2	Beregning av minimalt nattforbruk i sone SO01 . . . . .	30
4.3	Beregning av minimalt nattforbruk i sone SO14 . . . . .	30
4.4	Marginalkostnader SO14 . . . . .	40
4.5	Marginalkostnader SO01 . . . . .	41
4.6	Strømforbruk- og utgifter Svartediket VBA . . . . .	42
4.7	Kombinasjoner av strømpriser og N1-verdier . . . . .	42
4.8	Potensielle besparelser ved i2O . . . . .	46



# Forkortelser

ANU	Average night usage
UARL	Unavoidable annual real losses
UBL	Unavoidable background leakage
CARL	Current annual real losses
DMA	District Metered Area
ELL	Economic level of leakage
FAVAD	Fixed And Variable Area Discharges
ILI	Infrastructure leakage Index
IWA	International Water Association
MNF	Minimum natt-forbruk
NDF	Night Day Factor
NLR	Night Leakage Rate
PI	Performance Indicators
RTC	Real Time Control
SIV	System Input Volume





# 1. Introduksjon

I Norge blir omtrent 31 prosent av drikkevannet som fraktes fra behandling til forbruker borte på veien grunnet lekkasjer (CF mfl., 2022). Det er flere årsaker til lekkasjer, blant annet et gammelt ledningsnett, korrosjon, skader som følge av frost, dårlig utført arbeid og manglende sikring mot lekkasjer.

At drikkevann som har vært gjennom behandling og distribusjon lekker ut før det når abonnenten, resulterer i at det må brukes store ressurser på reparasjoner og vedlikehold av rørsystemene, i tillegg til kostnader ved å produsere vann som ikke blir brukt. Det finnes flere metoder for å redusere lekkasjenivået, slik som lekkasjesøk og reparasjoner. En problemstilling er at det kan koste mer å forebygge, reparere og finne lekkasjer, enn hva selve lekkasjen koster.

Trykksenkning kan være et forebyggende og relativt billig verktøy i arbeidet med å redusere lekkasjer. Tidligere studier viser at det er en sammenheng mellom trykk og lekkasjer, men det er varierende hvor sterk denne sammenhengen er. Tradisjonelt sett er en trykkreduksjonsventil satt til å levere et fast trykk ut fra ventilen, selv om vannforbruket hos forbruker vil variere på døgn- og sesongbasis. Dette fører til at trykket på ledningsnettet tidvis er unødvendig høyt og bygger seg opp når forbruket er lavt. Med en dynamisk styrt trykkreduksjonsventil kan man derimot justere trykket etter forbruket, som vil forhindre unødvendig høyt trykk og gi et mer jevnt trykk på ledningsnettet.

Bergen kommune installerte i 2015 et pilotsystem fra i2O for dynamisk, forbruksbasert trykkstyring, dette skulle erstatte den konvensjonelle trykkstyringen i en trykksone der trykket ut av ventilen var fast. Prosjektet foregikk til 2019. Resultater fra denne perioden tyder på en positiv effekt og uten klager fra abonnenter på lavt trykk. Men brudd og tekniske problemer under perioden gjorde det vanskelig å bruke resultatene videre.

Bergen kommune har våren 2023 installert et system fra samme leverandør som består av dynamiske trykkreduksjonsventiler og sendere. Effekten av dette systemet vil bli vurdert i to forsyningssoner (DMA) i Bergen kommune.

## 1.1 Problemstilling

I denne oppgaven vil det bli sett på sammenhengen mellom trykk og lekkasjer, med case-område i Bergen Kommune. Her har kommunen installert dynamiske trykkstyringssystem som skal sørge for at trykket i ledningsnett optimaliseres. I tillegg til sammenhengen mellom trykk og lekkasje, vil kost-nytte-effekten av et slikt system bli vurdert. For å kunne vurdere effekten av andre trykkreduskjoner/ innstillinger vil det også bli satt opp en hydraulisk modell i MIKE+ for de samme forsyningssonene.

Spørsmålene som vil bli forsøkt besvart i oppgaven er følgende:

- Hvordan ser lekkasjenivået ut før og etter installering av dette systemet?
- Hva er sammenhengen mellom trykk og lekkasje i sonene?
- Hvor store besparelser gir dette systemet, er det lønnsomt å installere et system for dynamisk trykkstyring?

## 2. Bakgrunn

I denne delen vil det gåes gjennom teori oppgaven videre bygger på: Lekkasje-teori, sammenhengen mellom trykk og lekkasjer, trykkstyring og kost-nytte-effekt ved trykk-senkning.

### 2.1 Lekkasjer

I 2022 estimerte Folkehelseinstituttet at det ble produsert 750 millioner m<sup>3</sup> drikkevann, av dette gikk 230 millioner m<sup>3</sup> ut som lekkasje (CF mfl., 2022). Norge har en stor andel lekkasje, som følge av et forsyningsnett i dårlig stand med stort behov for fornying og investering.

For å avklare begreper knyttet til vanntap i forsyningsnettet på tvers av landegrenser, innførte IWA en internasjonal standard modell for vannbalanse (Lambert og McKenzie, 2002). Denne er vist i figur 2.1. Denne tabellen forklarer hva som går inn og ut av et forsyningsnett. System Input Volume er det volumet som distribueres ut på ledningsnettet. Videre er det delt inn i forbruk og tap, Real Losses representerer delen av vannet som går tapt som resultat av lekkasjer. Lekkasjer, ulovlig/ufakturert forbruk og unøyaktighet ved målinger av forbruk bidrar til tapte inntekter fordi man ikke får fakturert for dette (Non Revenue Water).

I figur 2.2 vises 4 metoder for å redusere vanntap. De 4 metodene er

- Hastighet og kvalitet på reparasjoner - Hvor raskt og hvor godt reparasjoner utføres vil påvirke mengden vanntap.
- Aktiv lekkasjekontroll - Man setter av ressurser til å aktivt søke etter lekkasjer før de blir synlige. (Thornton mfl., 2008). For eksempel ved å lytte etter lekkasjer.
- Trykkforvaltning - Kan påvirke lekkasjevolum grunnet sammenheng mellom trykk og lekkasje. Lavt trykk kan redusere lekkasje, mens et høyt trykk kan resultere i større lekkasjevolum.

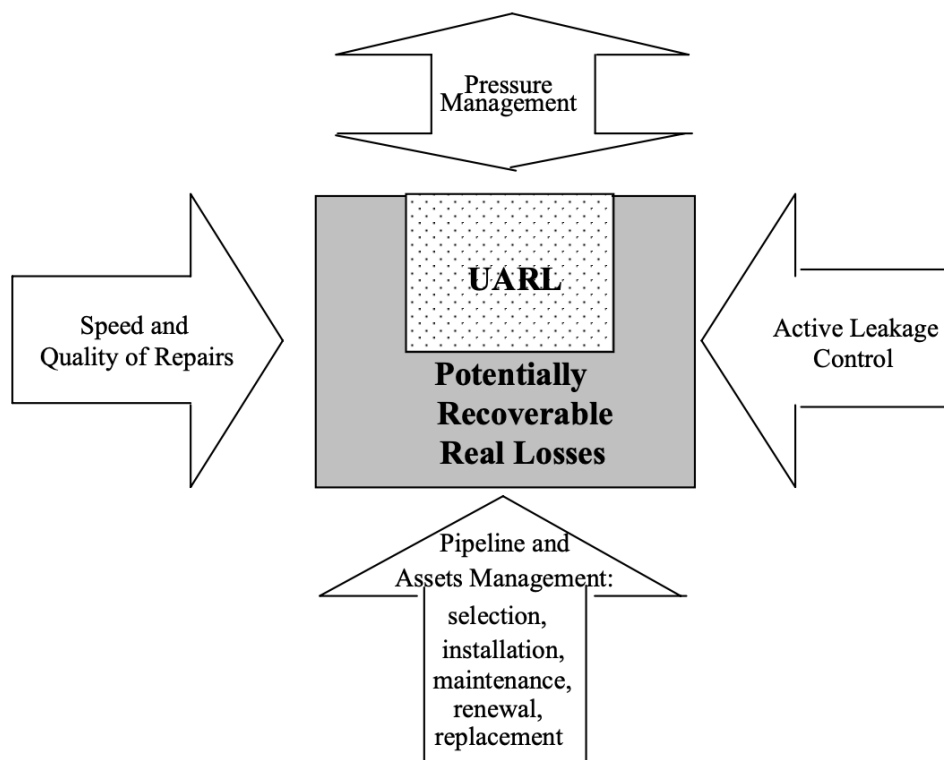
System Input Volume	Authorised Consumption	Billed Authorised Consumption	Billed Metered Consumption (including water exported)	Revenue Water
			Billed Unmetered Consumption	
		Unbilled Authorised Consumption	Unbilled Metered Consumption	Non- Revenue Water (NRW)
			Unbilled Unmetered Consumption	
	Water Losses	Apparent Losses	Unauthorised Consumption	
			Metering Inaccuracies	
		Real Losses	Leakage on Transmission and/or Distribution Mains	
			Leakage and Overflows at Utility's Storage Tanks	
Leakage on Service Connections up to point of Customer metering				

**Figur 2.1:** Vannbalanse-modell fra IWA (Lambert, 2002)

- Systemforvaltning- Rehabilitering, vedlikehold og fornyelse av ledningsnett vil bidra til å redusere lekkasjenivået.

Alle disse metodene kan bidra til å begrense vanntap, men det er også noen tap som er uungåelige (UARL). Dette er representert ved den hvite firkanten i figur 2.2. Den grå firkanten viser de unngåelige tapene. Sammen utgjør den hvite og grå firkanten totale, årlige tap (CARL) og forholdet mellom disse er beskrevet ved ILI (CARL/UARL). Denne brøken beskriver hvor godt forsyningssystemet er forvaltet. En ILI-verdi på 1, dvs. der CARL=UARL, er optimalt og betyr at man har så lite vanntap som mulig. En ILI-verdi på 3 betyr at det er mulig å senke lekkasjenivået til en tredjedel av dagens lekkasjenivå (Lambert og McKenzie, 2002). En nøyaktig ILI-verdi avhenger av gode data om lekkasjer, trykk og ledningsnett og ILI som indikator på tilstanden til ledningsnett er ifølge Liemberger og McKenzie (2005) ikke allment brukt. En ILI-verdi på under 1,5 er "Excellent", mellom 2,5 og 3 er "Fair" og over 3,5 er "unacceptable" ifølge Seago mfl. (2005). Selv om en ILI-verdi på 1 og at man ikke har unngåelig vanntap er teoretisk optimalt, kan det økonomisk optimale lekkasjenivået ligge høyere. Dette er fordi det ikke i alle tilfeller vil være økonomisk gunstig å redusere lekkasjer, da det avhenger av blant annet marginalkostnader på forsyningsvann og kostnader knyttet til lekkasjereduksjon. Det må derfor gjøres en økonomisk vurdering av hvilke tiltak som skal settes inn og i hvor stor grad man skal benytte seg av disse.

I tillegg til ILI finnes det flere måter å måle hvor godt systemet er forvaltet på når det gjelder vanntap. En vanlig metode er å måle lekkasjeandelen som andel av vannet som går inn i systemet (SIV). Ulempen ved denne metoden er at lekkasje-andelen avhenger av forbruket. Ved lavt forbruk vil andelen lekkasje per forbruk være høyere enn andelen



**Figur 2.2:** 4 metoder for å redusere tap fra lekkasjer (Lambert, 2002)

lekkasje per forbruk ved et høyere forbruk, selv om lekkasje-volumet er det samme i begge situasjoner. Dette beskriver derfor dårlig hvor godt systemet er forvaltet og er en kritisert metode (Winarni, 2009).

En metode anbefalt av IWA er å beregne lekkasjeandelen som volum lekkasje per tilknytningspunkt (Service connection) per dag (likning 2.1). Denne metoden er egnet fordi lekkasjer i større grad forekommer i tilknytning til disse knutepunktene enn på selve ledningene i tett bebygde områder.

$$L = \frac{V}{N_s * d} \quad (2.1)$$

I områder der det er færre tilknytningspunkter (under 20 per km ledning), brukes volum lekkasje per km ledning per dag.

$$Q = \frac{V}{L_m * d} \quad (2.2)$$

$V$ = Lekkasjevolum  $N_s$ = Antall tilknytningspunkter  $L_m$ = Lengde kommunale ledninger  
 $d$ = døgn

IWA anbefaler uansett ILI fordi den er mer presis og avhenger av flere variabler enn

lekkasje per tilknytningspunkt per dag.(Lambert og McKenzie, 2002)

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (2.3)$$

hvor

$$UARL(Liter/dag) = (18 * L_m + 0,8 * N_s + 25 * L_p) * P \quad (2.4)$$

$$UBL(liter/time) = (20 * L_m + 1.25 * N_s + 0,333 * L_p) * (P/50)^{1,5} \quad (2.5)$$

- $L_m$ = Lengde ledninger (Km)
- $N_c$ = antall tilknytningspunkter
- $L_p$ = lengde private ledninger (m)
- $P$ = Trykk (m)

Likning 2.4 viser en enkel metode å regne ut unngåelige tap (Lambert og McKenzie, 2002). og likning 2.5 viser beregning av uunngåelig bakgrunnslekkasje (Lambert, 2009). Formelen for UBL ble utviklet gjennom flere tester i England og Wales i løpet av 1990-tallet i forbindelse med arbeid for å redusere lekkasje til et påkrevd nivå. Denne formelen har senere blitt brukt i flere andre land. For UBL brukes en N1-verdi på 1,5, mens man for UARL antar at N1-verdien er 1 for større systemer med ulike typer rørmateriale. Mer om N1-veriden under kapittel 2.2.

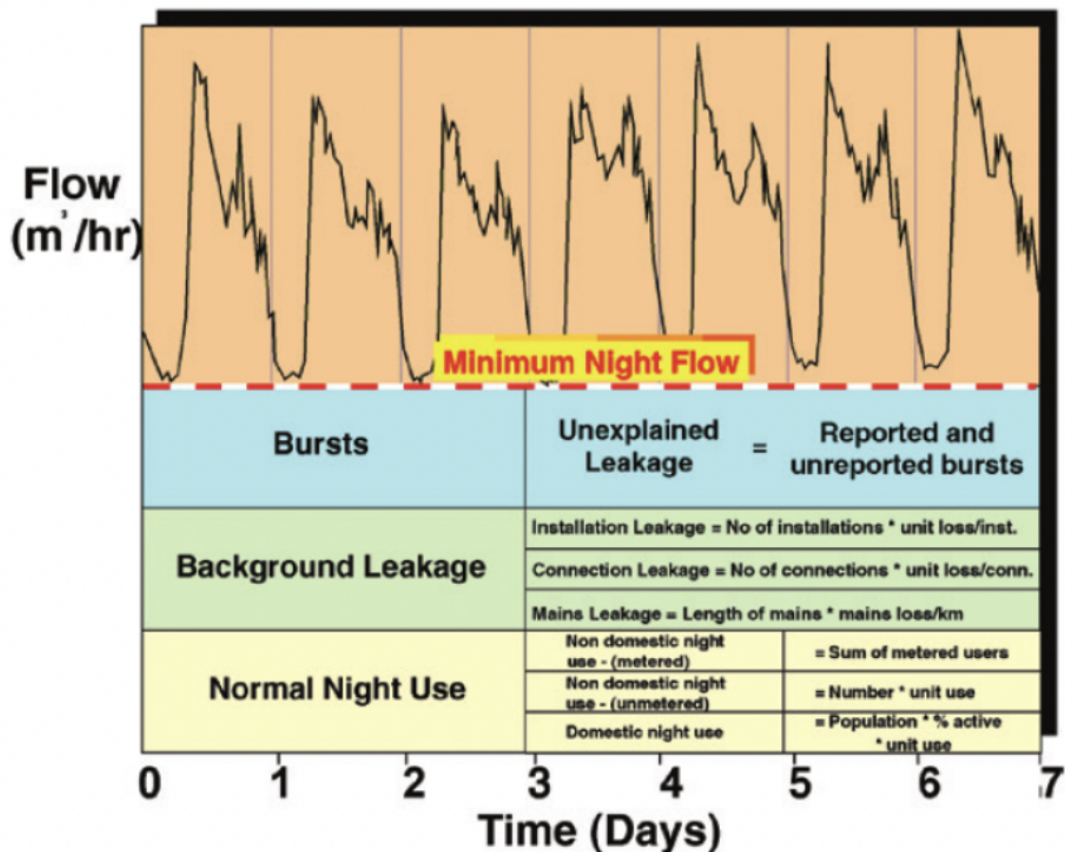
Alle metodene for å vurdere hvor godt systemet er forvaltet bygger på beregninger av lekkasjevolum. Dette kan beregnes på flere måter (Top down eller bottom up)

- **IWA vannbalanse** Lekkasjer (real losses) beregnes etter autorisert forbruk og tilsynelatende tap har blitt beregnet. Dette er en såkalt Top-down- metode, og ulempen er at feil ved beregninger av andre komponenter i vannbalansen vil resultere i feil i lekkasjenivå.
- **Natt-forbruk** Når forbruket er på sitt laveste om natten, og variasjonene i forbruk er små kan man beregne det generelle lekkasjenivået. Dette gjøres ved å måle nattforbruk når trykk og forbruk har stabilisert seg på sitt laveste nivå. Når man har funnet minimalt nattforbruk (MNF), må det beregnes et nattforbruk som består av normalt nattforbruk i husholdninger og industri, og uunngåelig bakgrunnslekkasje (UBL) (Hamilton og McKenzie, 2014) som vist i figur 2.3. Det beregnede nattforbruket trekkes fra det observerte nattforbruket for å finne lekkasjevolumet(NLR).

Dette er en bottom-up-metode. (Lambert mfl., 2017).

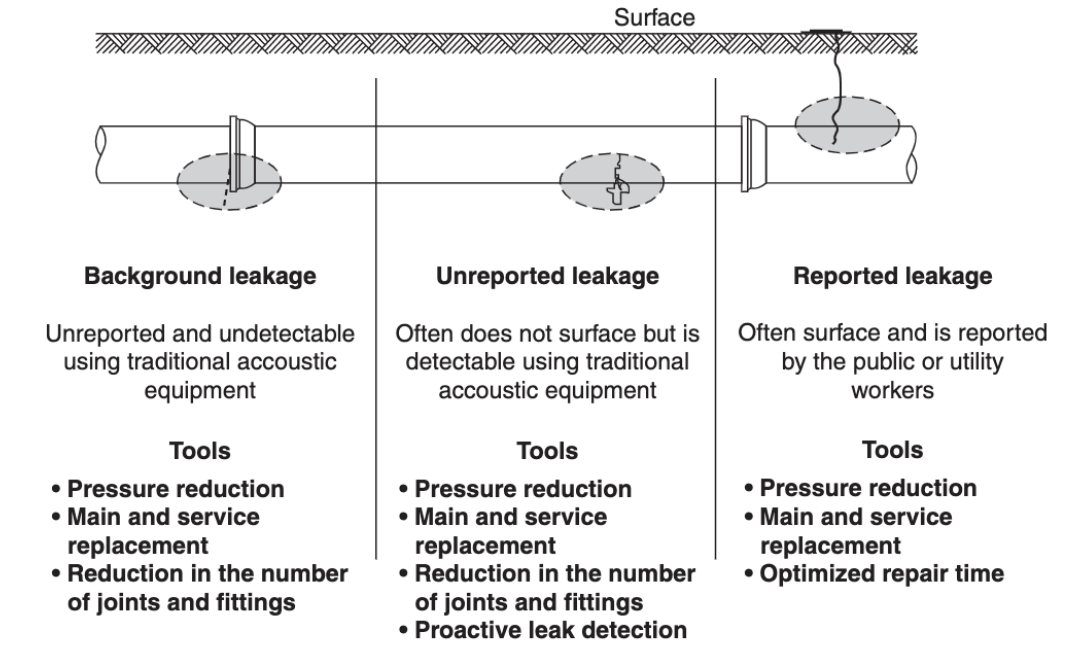
$$\text{MNF observert} - \text{MNF beregnet} = \text{Avoidable leakage} \quad (2.6)$$

- **Statistikk på reparasjoner** Ved å se på hvor mange reparasjoner av lekkasjer man har i løpet av en periode, brukes data om dette som en indikator på hvor mange nye lekkasjer som oppstår i løpet av samme periode. Dette er en Bottom-up-metode.



Figur 2.3: Nattforbruk (Hamilton og McKenzie, 2014)

I figur 2.4 vises de ulike lekkasjetyperne. Rapporterte lekkasjer er de lekkasjene som resulterer i vannansamlinger på overflaten. De urapporterte er mindre lekkasjer som kan finnes ved konvensjonelt lekkasjesøk. Bakgrunnslekkasjer er små lekkasjer man ikke finner ved konvensjonelt lekkasjesøk. Et verktøy for å redusere alle disse lekkasjene, er trykkreduksjon.



**FIGURE 3.1** Components of real losses and tools for intervention. (Source: Ref. 2.)

**Figur 2.4:** Ulike lekkasjetyper (Thornton mfl., 2008)

## 2.2 Trykk og lekkasje: N1-eksponenten

En mye brukt likning for beregning av lekkasje er likning 2.7 der N1-eksponenten inngår. Denne forklarer forholdet mellom trykk og lekkasje. En N1-eksponent med verdi 0,5 forutsetter at vannet går ut av røret i en fri stråle under atmosfærisk trykk. Eksponenten er i virkeligheten avhengig av ulike faktorer, slik som rørmateriale, lekkasjens hydrauliske egenskaper, egenskaper i materialet rundt røret og vannforbruk. Den kan variere fra mellom 0,5 til 2,79 (Deyi mfl., 2014). I følge Thornton og Lambert (2005), er forholdet mellom trykk og lekkasje vanligvis betydelig høyere enn den teoretiske sammenhengen der eksponenten N1 har verdi 0,5, da ledningsnettene kan bestå av en blanding av rørmaterialer.

$$Q = C_d * A * \sqrt{2g} * h^{N1} \quad (2.7)$$

Q= lekkasje ( $\frac{m^3}{t}$ )

$C_d$ =Avløpskoeffisient

A= arealet av lekkasjeåpning ( $m^2$ )

h= trykk i meter vannsøyle (mVs)



$N_1$  = lekkasje-eksponent

Fixed and variable area discharges (FAVAD) er en metode for å beregne lekkasje som bygger på likning 2.7, men tar hensyn til at lekkasjeåpningen kan utvide seg som følge av trykk. Dette er vist ved koeffisient  $A$  og  $B$ , der  $A$  representerer den initielle delen av lekkasjeåpningen, og  $B$  representerer den delen av lekkasjeområdet som potensielt utvider seg på grunn av trykk (2.8). (Kabaasha mfl., 2016).

$$Q = C_d * \sqrt{2g} * (A * h^{0,5} + B * h^{1,5}) \quad (2.8)$$

Likning 2.9 viser forholdet mellom lekkasje og trykk

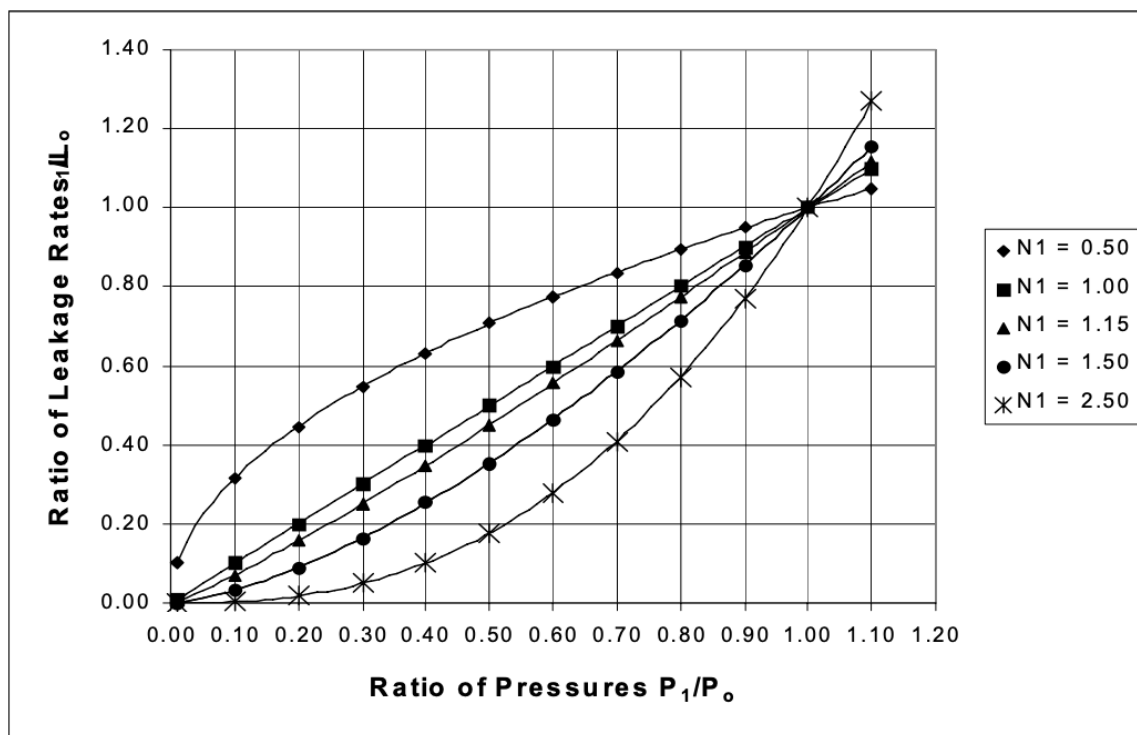
$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_1} \quad (2.9)$$

$Q_1$  = lekkasje etter trykkendring

$Q_0$  = lekkasje før trykkendring

$P_1$  = endret middeltrykk i sonen

$P_0$  = initielt middeltrykk i sonen



**Figur 2.5:** Lekkasje og trykk (Thornton og Lambert, 2005)

I figur 2.5 vises forholdet mellom lekkasje- og trykkreduksjon basert på likning 2.9. Det

er brukt ulike verdier for N1 for å illustrere forholdet mellom trykk og lekkasje. Man antar ifølge Lambert og McKenzie (2002), at N1-verdien for store systemer med ulike rørmaterialer er 1, altså en lineær sammenheng mellom trykk og lekkasje. Dette er en antatt verdi, som brukes når informasjon ikke er tilgjengelig.

Laboratorie-tester fra South-West Water (UK), Johannesburg Universitet og C.I.A.C.U.A i Colombia har kommet frem til N1-verdier som stemmer overens med hverandre, N1-verdier for sirkulære hull i rør (Thornton og Lambert, 2005).

- nær 0,5 for metall- og PVC-rør ( $Re > 4000$ )
- sannsynligvis nær 0,5 for PE-rør
- mellom 0,5 og 1 for små lekkasjer

For brudd formet som en rift er forholdet mellom lengde og bredde på riften en viktig parameter, jo større verdi denne brøken har, jo høyere blir N1-verdien. Dette er sannsynligvis fordi riften blir utvidet av trykket som virker på rørveggene, og jo lengre riften er jo større vil lekkasjeåpningen bli (Greyvenstein og Van Zyl, 2007).

I systemer der lekkasjer repareres og bakgrunnslekkasjer som ikke er mulig å oppdage ved konvensjonelt lekkasjesøk dominerer, kan N1-verdien være høyere, opp mot 1,5. En likning som har vist seg å stemme godt overens med observasjoner er likning 2.10. Den tar hensyn til ILI-verdien for systemet i tillegg til rørenes stivhet ( $p$ ), der  $p$  måles i prosent. Denne er brukt i figur 2.6 og sammenlignet med test-resultater.

$$N1 = 1,5 - \left(1 - \frac{0,65}{ILI}\right) * \frac{p}{100} \quad (2.10)$$

(Thornton og Lambert, 2005)

Country	ILI	p%	Power Law N1	
			Predicted	From Test
Australia	1.3	43%	1.29	1.33
U.S.A	3.0	27%	1.29	1.33
U.S.A	5.5	99%	0.63	0.67
U.S.A	12.0	100%	0.55	0.60

**Figur 2.6:** Beregnede og observerte verdier for N1 (Thornton og Lambert, 2005)

## 2.3 Trykkforvaltning

God trykkforvaltning er en av metodene for å redusere lekkasjer. Trykkforvaltning dreier seg om å styre trykket på nettet, og kan gjøres på ulike måter.

For å gjennomføre et trykkstyringsprosjekt deles nettverket inn i ulike målesoner (DMA) som gjør det lettere å holde kontroll på systemet. Data for vannføring og trykk i systemet

samles så inn. En ofte brukt metode er å ta utgangspunkt i MNF. Da forbruket om natten er lavere og mindre utsatt for variasjoner enn om dagen, kan det brukes til å si noe om hvor mye vann som forsvinner i lekkasjer.

For å styre trykket brukes trykkredusjonsventiler, og disse kan ha ulike innstillinger.

- **Konvensjonell reduksjonsventil** er den mest brukte trykkredusjonsventilen, der trykket ut fra ventilen settes til ønsket verdi og er uavhengig av vannføringen gjennom ventilen.
- **Forbruksmodulert mekanisk reduksjonsventil** Der trykket avhenger av vannføringen gjennom ventilen.
- **Elektronisk styrt reduksjonsventil med fleksibelt styringsregime** styrer trykket i sonen ved å opprettholde trykket i et kritisk punkt i sonen. Det kritiske punktet må bestemmes, og det må gjøres vurderinger av hvor dette skal være. Det kan være punktet lengst unna reduksjonsventilen, det kan være det høyeste punktet i sonen eller det kan være trykket ved uttak til brannvann. Ved å holde dette trykket vil man unngå unødvendig høye trykk i sonen. Å styre denne typen reduksjonsventil krever at sendere gir informasjon til aktuator på reduksjonsventilen om hvilket trykk den skal gi ut, altså en styring i sanntid (RTC).

### 2.3.1 Trykkforvaltning og krav til sikkerhet

Det å ha et tilstrekkelig høyt trykk er viktig fordi trykk fungerer som en sikkerhet mot forurensning i distribusjonssystemet. I hovedplan for vannforsyning i Bergen kommune står det at det minste trykket på ledninger kommunen skal overta er 2,5 bar («Hoveplan for vannforsyning 2019-2028» 2019).

For lavt trykk kan true forsynings sikkerheten ved at det oppstår innsug på vannledningen, slik at vannledningen tar inn forurenset vann fra omgivelsene. Trykk fungerer derfor som en sikring mot forurensning av forsyningsvannet.

Ved brann settes det krav til hvor høyt trykk det skal være på ledningen, da det må kunne tas ut mye vann over korte perioder (20-50 l/s) (*TEK17, §11-17* 2017).

## 2.4 Kost-nytte ved aktiv trykkforvaltning

For å gjøre en kost-nytte-analyse av aktiv trykkforvaltning må først kostnader og nytte klassifiseres.

Kostnader ved trykkoptimalisering

- Installasjon av- og investering i system
- Drift og vedlikehold av systemet

Nytte av trykkoptimalisering

- Redusert lekkasje
- Lavere bruddfrekvens på rør
- Lengre levetid på rør

Den reduserte lekkasjen resulterer i en reduksjon i volum forsyningsvann som må produseres. Produksjon av forsyningsvann innebærer faste og variable kostnader. Faste kostnader er for eksempel lønn til personale, husleie, oppvarming av lokaler, avskrivninger på eiendeler og drift av systemer.

For å se på reduksjon i kostnader som følge av redusert lekkasje er det interessant å se på de variable kostnadene ved vannproduksjon og distribusjon. De variable kostnadene er hovedsakelig strømforbruk og kjemikalieforbruk. Vannet renses før det videreføres til distribusjon, og distribusjonen innebærer ofte pumping hvis det er høydeforskjeller i forsyningssonen. Dette medfører kostnader til kjemikalier og strøm. Jo mer vann som produseres, jo høyere vil disse variable kostnadene bli.

Ved lekkasjer på vannledninger, vil en andel av dette vannet renne inn på spillvannsledninger eller fellesledninger. Dette vannet videreføres så til renseanlegg, der det renses sammen med spillvann. Dette medfører kostnader til energi og kjemikalier som inngår i renseprosessen. I Norge regner man med at andelen fremmedvann i kommuner med delvis fellessystem er på 53% og 29% for kommuner med separatsystem (von Scherling mfl., 2020)

I tillegg er det sett på at lavere trykk fører til lavere bruddfrekvens og lengre levetid på rør, noe som vil ha positiv økonomisk effekt. Ifølge Pearson mfl. (2005) er det en tydelig sammenheng mellom trykk og antall brudd på ledninger.

$$\frac{B_1}{B_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_2} \quad (2.11)$$

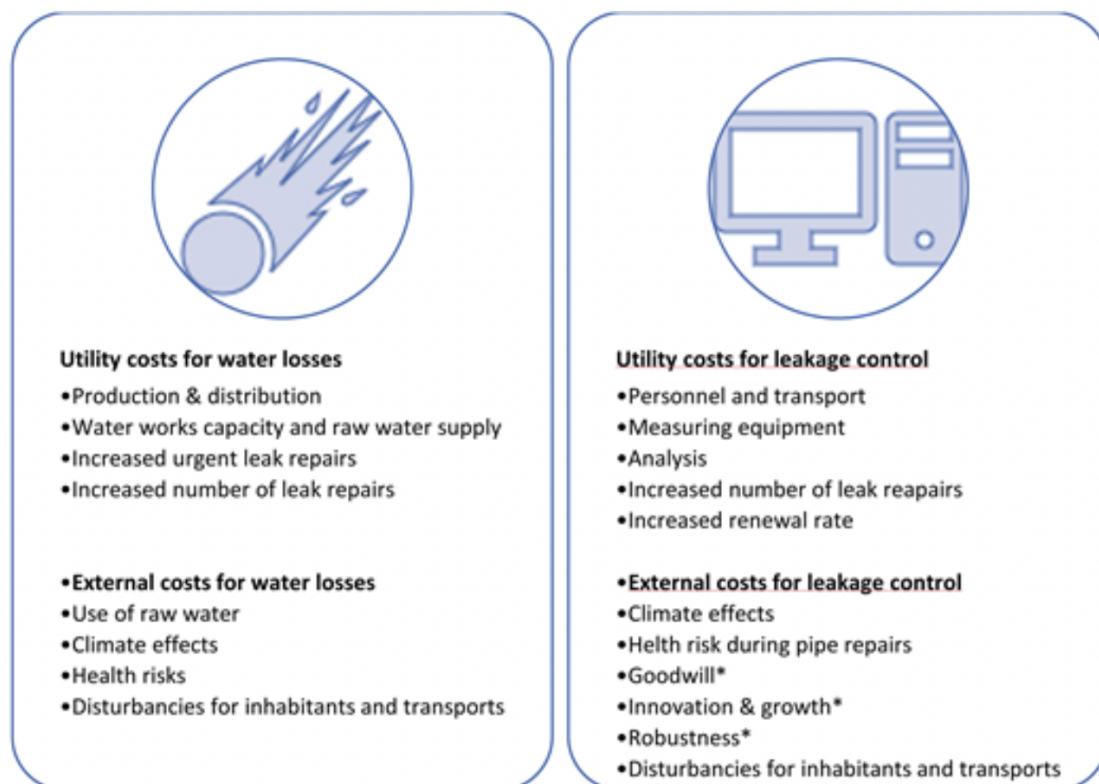
Der  $B_1$  er bruddfrekvens etter trykkendring og  $B_0$  er bruddfrekvens før trykkendring. Ved bruk av likning 2.11 fant man en verdi for  $N_2$  på 2,47.

### 2.4.1 Økonomisk optimalt lekkasjenivå

Selv om lekkasjereduksjon kan redusere variable kostnader er det ikke slik at et så lavt som mulig lekkasjenivå nødvendigvis er økonomisk gunstig. Det økonomiske lekkasje-

nivået ligger der kostnadene og nytten ved lekkasjereduksjon er like store, altså krysningspunktet. Hvor dette ligger vil avhenge av marginalkostnadene på forsyningsvann og hvor store kostnader man har i forbindelse med reduksjonen.

I prosjektet til Malm mfl. (2018), Beregning av bærekraftig lekkasjenivå, ble det utarbeidet en metode for å finne bærekraftig lekkasjenivå, som ikke bare er basert på kostnader og økonomisk nytte, men også tar med faktorer som miljømessige og sosiale kostnader ved lekkasjer. Denne metoden heter SELL (Sustainable economic level of leakage) (Malm mfl., 2018). Dette kan for eksempel være at lekkasjer kan forsinke trafikk og være en ulempe for innbyggere, i tillegg til at lekkasjer kan føre til helserisiko som følge av undertrykk og forurensninger som kan trenge inn på ledningen som vist i figur 2.7.



Figur 2.7: Kostnader ved SELL (Malm mfl., 2020)

## 2.5 Tidligere studier: kost-nytte

Tidligere studier viser at det kan være lønnsomt å investere i trykkoptimalisering, som kan føre til lavere bruddfrekvens og lekkasjevolum. På den andre siden medfører også trykkoptimalisering behov for investeringer og tapte inntekter som følge av at betalt forbruk potensielt kan reduseres ved lavere trykk (Gomes mfl., 2011).

### 2.5.1 Norske funn

I en tidligere masteroppgave ved NMBU (Haugård (2021)) ble det konkludert med at en reduksjon i trykk på 1 bar ville resultere i en årlig lekkasjereduksjon på omtrent 49200 kubikkmeter og en besparelse på 53000 NOK/år. Her var marginalkostnaden på vann på 0,9 kr per kubikkmeter. Kostnaden for rensing av fremmedvann til avløpsrensing ble også tatt med i beregningen. Dette gjaldt for Nordbergsonen i Oslo kommune (Haugård, 2021).

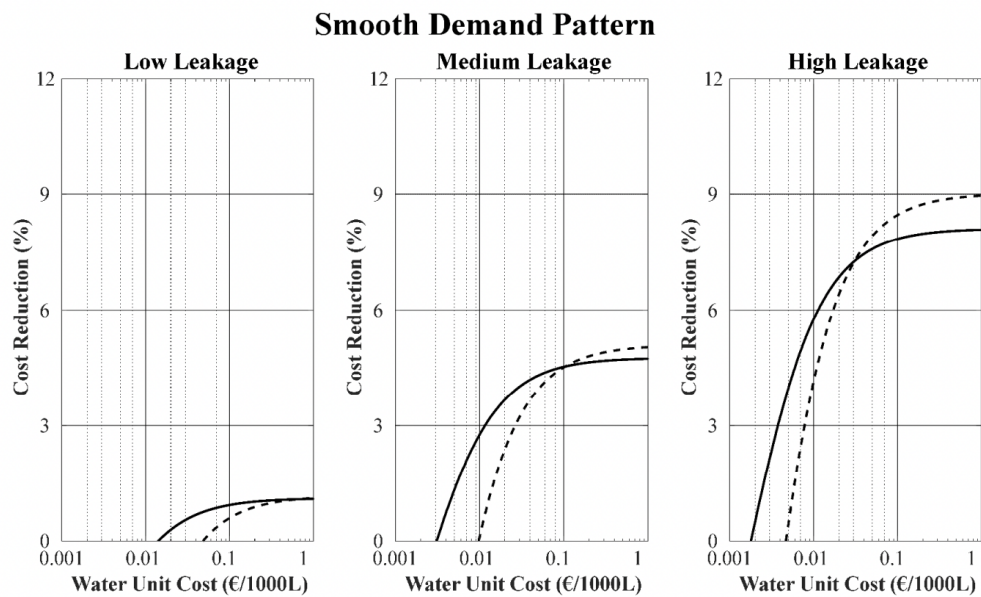
### 2.5.2 Internasjonale funn

En studie gjort av Gomes mfl. (2011) med to case-studier, viste at det var mulig å redusere lekkasjenivået med nesten 200 m<sup>3</sup> og spare 181€ per dag/ 66 000€ per år i følge et case-studie. Dette var forutsatt en produksjonpris på vann på 1€ per kubikkmeter. Det andre case-studie som ble gjennomført viste også at trykkstyrt ventil var den som reduserte lekkasjer mest.

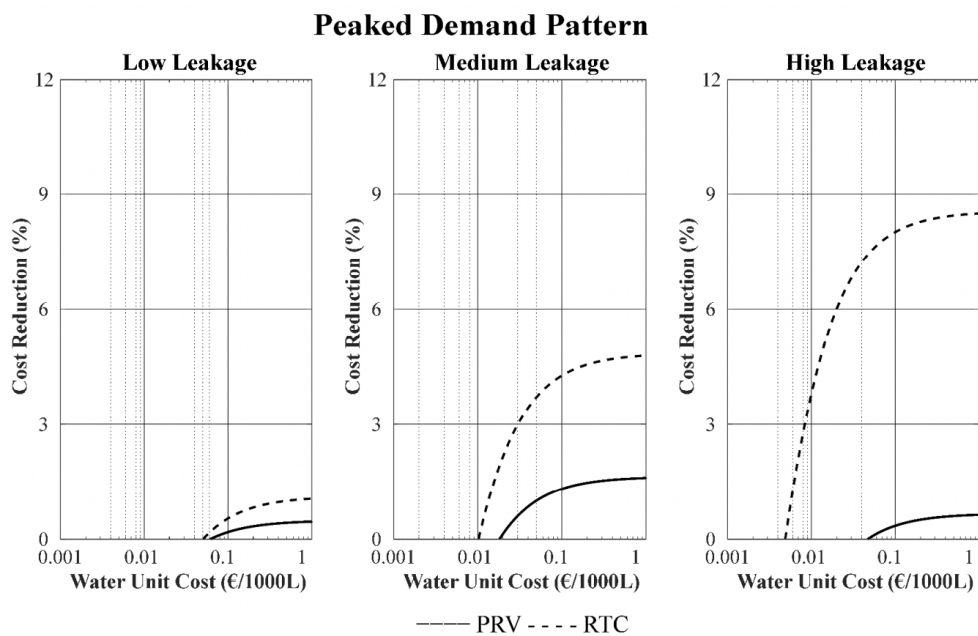
En kost-nytte-analyse gjort med data fra 92 vannverk i Finland viser at det økonomiske lekkasjenivået ligger høyere enn dagens lekkasjenivå, og at nåverdiberegninger er negative (Ahopelto og Vahala, 2020). Dette begrunnes med at marginalkostnadene for vann er lave, medianen for vannets marginalkostnad brukt i denne studien var 0,11 € per kubikkmeter. Det konkluderes med at trykkforvaltning ikke er økonomisk gunstig ved moderate lekkasjenivåer.

En studie fra 2017 gjort i Italia (Creaco mfl., 2017) konkluderer med det samme, nemlig at trykkreduksjon ikke er økonomisk gunstig ved lave lekkasjenivåer og ved lav marginalkostnad på forsyningsvann. Ved middels høye lekkasjenivåer og marginalkostnader anbefales konvensjonelle trykkredusjonsventiler. I tilfeller der lekkasjevolum og marginalkostnader for vann i systemet er høyt, er elektronisk trykkstyrt reduksjonsventil som mottar informasjon fra kritisk node i sanntid den mest økonomiske løsningen, dette er vist i figur ?? og ?. I denne studien er lavt, middels og høyt lekkasjenivå henholdsvis 3-5%, 15-16% og 30-31%(Creaco mfl., 2017)

De finske og italienske studiene viser altså at det ikke nødvendigvis er økonomisk gunstig å gjennomføre trykkreduksjons-prosjekter der lekkasjenivåene og marginalkostnadene for forsyningsvann er lave.



**Figur 2.8:** Kostnadsreduskjon ved normalt forbruk (Creaco mfl., 2017)



**Figur 2.9:** Kostnadsreduskjon ved maksimalt forbruk (Creaco mfl., 2017)





## 3. Metode

### 3.1 Case-studie i Bergen kommune

Bergen kommune har installert elektrisk styrte trykkreduksjonsventiler med mål om å redusere lekkasjevolum. Disse har blitt installert i to forsyningssoner - Nestun og Storetveit, senere referert til som henholdsvis SO14 og SO01, vist i figur 3.1. SO14 har 9380 beboere, SO01 har 5621 beboere. I SO14 er det ingen trykkøkingsstasjoner, mens det er to i SO01.

I tillegg til endringen i trykkstyringen som følge av dette systemet, er det satt opp en hydraulisk modell ved hjelp av MIKE+ for å simulere trykkstyringsregimer, både med faste utgangstrykk og forbruksmodulert trykk. Dette er gjort for å få et større grunnlag for å vurdere effekten av trykkstyringen.

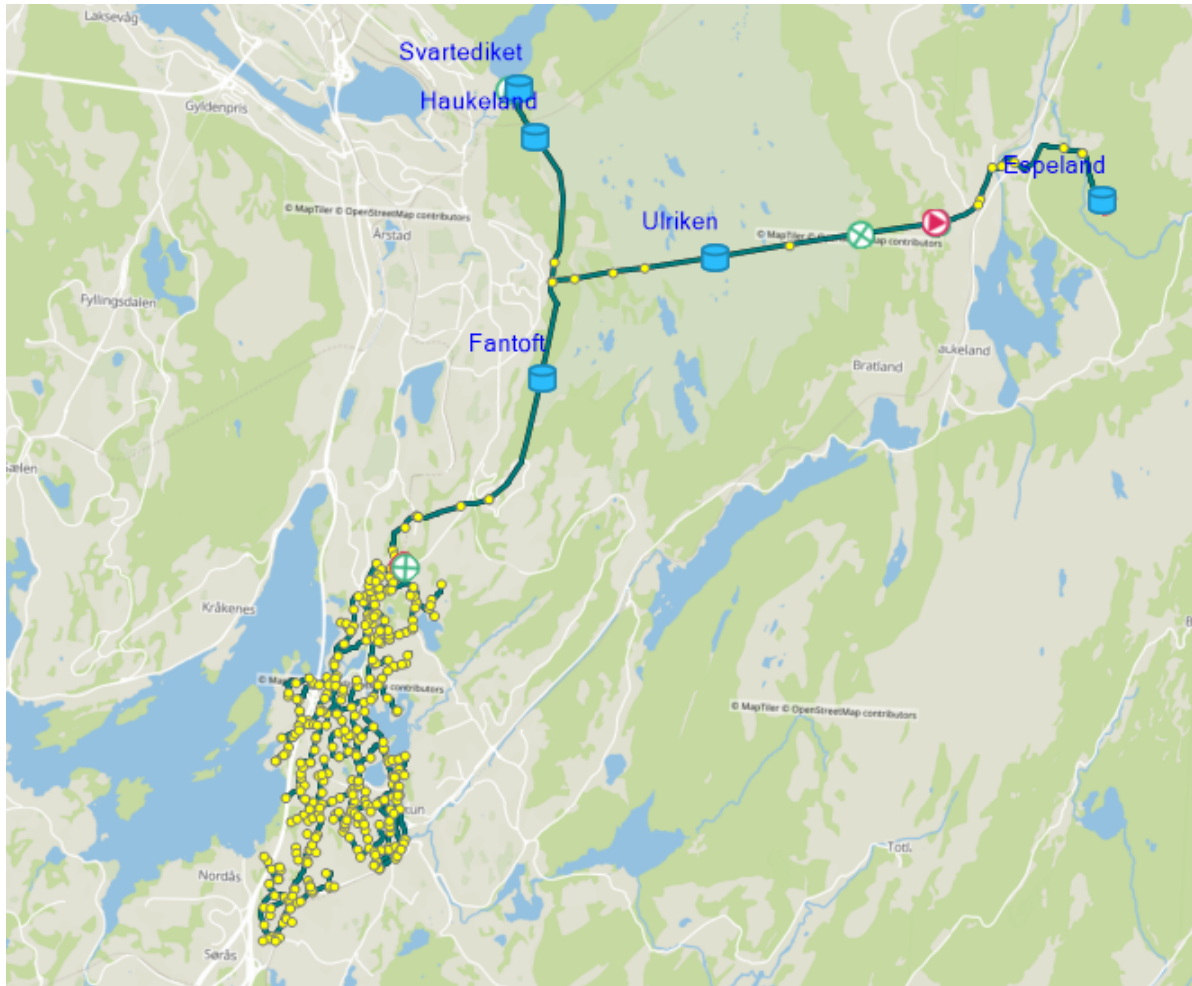
For å kunne vurdere de eventuelle besparelsene ved ulike trykkstyringsregimer er det hentet inn data om kostnadene Bergen kommune har for vannbehandling- og distribusjon.

### 3.2 Oppsett av modell i MIKE+

For å simulere lekkasjevolumet ved forskjellige trykkinnstillinger ble det satt opp en modell i MIKE+. Dette programmet er valgt fordi Bergen kommune hadde eksisterende modeller og at forbruk kan tildeles de enkelte forbrukerne. Dette gjør at modellen kan lages presis nok for å gjøre troverdige simuleringer. En modell ble satt opp for SO01, og en for SO14.

Kartdata over husholdninger og antall personer per husholdning ble hentet inn fra Bergen kommune sin database, og lagt inn i modellen. Det ble så hentet inn forbrukskurver for forsyningssonene fra kommunens SCADA-system, som viste det faktiske forbruket. Dette ble gjort for å kunne kalibrere modellen mot det faktiske forbruket. For å justere modellen sjekkes forbrukskurven på hovedledning til forsyningszone etter trykkreduksjonsventilen opp mot det faktiske forbruket. Dette er fordi volumstrømmen på hoved-

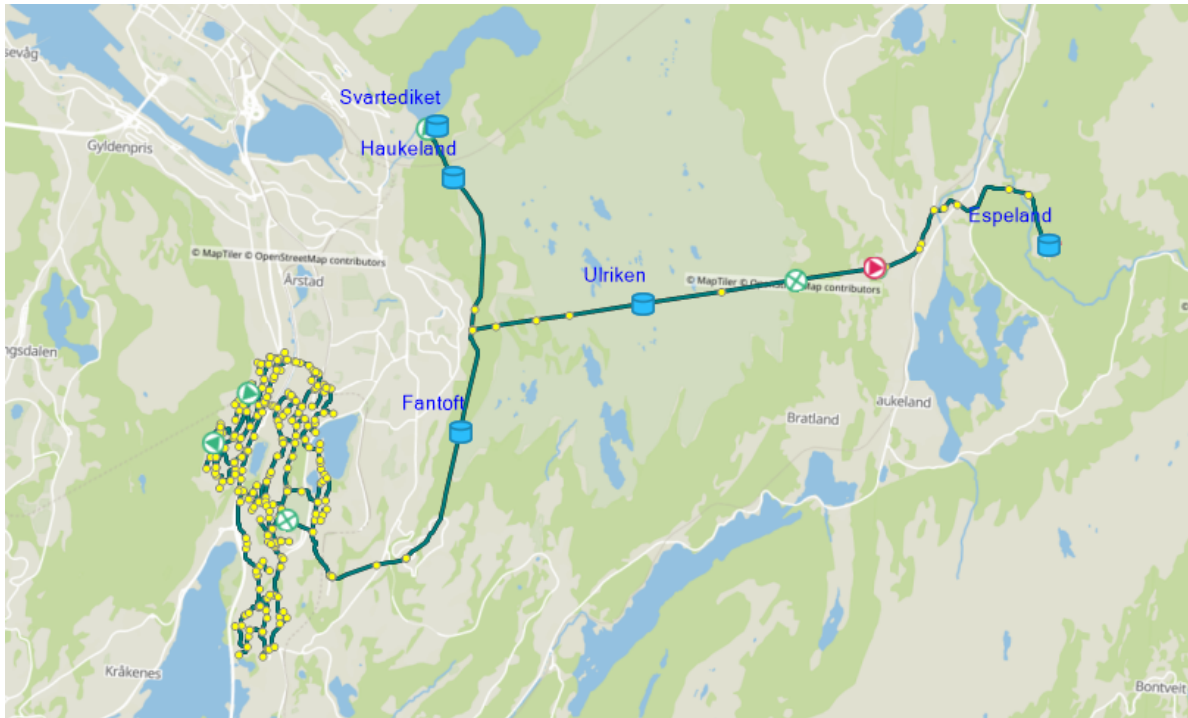




**Figur 3.2:** Forsyningszone SO14, Bergen Vann

ledningen skal forsyne hele sonen, og skal stemme overens med kurven for det faktiske, totale forbruket. Det totale forbruket ble fordelt utover sonen med samme forbruk per person overalt. En unøyaktighet ved denne metoden er at forbruksmønsteret er basert på alt forbruk, men kun fordeles på husholdningsforbruk. Det ble valgt ut en periode med varighet på en uke. Denne uken var representativ og fulgte et stabilt mønster. Siden forbruket i husholdninger varierer med tiden på døgnet, ble differansen mellom målt timesforbruk og gjennomsnittforbruk beregnet. Avviket mellom målt timesforbruk og gjennomsnittforbruk ga en timesfaktor til hver time. Denne faktoren ble så lagt inn i modellen, og resulterte i et forbruksmønster.

Det beregnede forbruket består av husholdningsforbruk, industri, unngåelige tap (UBL), og unngåelige tap (trykkavhengig lekkasje) som vist i likning 3.1. Første steg var å beregne forbruk i sonene ved å legge inn forbruk for hver husholdning og for industri. For husholdninger ble antall beboere multiplisert med et forbruk på  $140 \text{ l/d/person}$ , som anbefalt av Norsk vann rapport B20 (Sivertsen og Bomo, 2016). Forbruket fra husholdninger ble overført til noder ved aggregering-funksjon i MIKE+. For industri ble forbruk



**Figur 3.3:** Forsyningszone SO01, Bergen Vann

lagt inn direkte, ettersom det allerede fantes målinger på dette forbruket.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{husholdning}} + Q_{\text{industri}} + Q_{\text{lekkasje}} \quad (3.1)$$

### 3.2.1 Beregning av lekkasje ved hjelp av minste nattforbruk

I tabell 3.1 er det satt opp ulike likninger for å beregne lekkasje ved MNF-metoden. For å finne lekkasjevolumet vurderes beregnet minimalt nattforbruk mot målt minimalt nattforbruk, og differansen her utgjør lekkasjen ved minimalt nattforbruk. Average night usage (ANU) domestic forteller hvor stort forbruk man har i husholdninger om natten, det tas utgangspunkt i at 6% av befolkningen er aktive hver time om natten, og at forbruket i hovedsak skyldes toalettbesøk. Et gjennomsnittlig vannforbruk for å spyle ned er på 10 liter (Hamilton og McKenzie, 2014). Selv om man benytter vann til andre formål om natten i husholdninger er dette en så liten andel at det neglisjeres (Hamilton og McKenzie, 2014).

ANU non domestic er forbruket til industri om natten, som kommunen har målinger på. Det gjennomsnittlige timesforbruket til industri ble multiplisert med en natt-faktor på 0,4 etter å ha vurdert forbruksmønster for industri.

Uunngåelige tap (UBL) ble beregnet etter formel vist i tabell 3.1, så fordelt på alle noder og lagt inn som en konstant i modellen. Selv om denne lekkasjen også er trykkavhengig, er den så liten at den for enkelhets skyld legges inn som konstant.

**Tabell 3.1:** Minimalt nattforbruk, (Hamilton og McKenzie, 2014)

Likning	Variabler
ANU domestic = PE*0,06*SS	PE= antall personer, SS= Sистерne -størrelse, Enhet: L/h
ANU non domestic	Hentes fra kommunens målinger Enhet: L/h
ANU total =ANU domestic +ANU non domestic	Enhet: L/h
UBL = (20*Lm + 1,25*Ns +0,033*Lc) *(P/50) <sup>N1</sup>	Unavoidable background losses (UBL) Enhet: L/h
MNF beregnet = ANU total + UBL	Minimalt beregnet nattforbruk Enhet: L/h
AL= MNF teoretisk -MNF observert	Avoidable losses (AL) Enhet: L/h

Summen av ANU total og UBL utgjør det beregnede minimale nattforbruket, dette blir så trukket fra det observerte minimale nattforbruket. Differansen representerer unngåelig lekkasje. Denne lekkasjen er trykkavhengig og blir lagt inn i modellen som emittere.

### 3.2.2 Trykkavhengig lekkasje- Emittere

Utenom den unngåelige lekkasjen finnes også den unngåelige lekkasjen som er trykkavhengig (AL). Denne lekkasjen ble lagt inn i modellen ved emittere, en funksjon for trykkavhengig forbruk. Likningen for emittere er vist i likning 3.2

$$Q = K * h^{N1} \quad (3.2)$$

der  $K = C_d * A * \sqrt{2g}$

Emittere ble lagt i alle tilknytningspunkter i sonene. Det er knyttet stor usikkerhet til koeffisienten K og eksponenten N1 som inngår i likning 3.2. Disse ble forsøkt kalibrert inn ved å sammenligne resultatene i modell opp mot målt forbruk. Kurver over målt og modellert forbruk ligger i kapittel 4.2.

### 3.2.3 Kritiske trykkpunkter

Kritiske punkter er steder i sonene der et visst trykk må opprettholdes. Disse punktene kan være bestemt ut fra forskjellige vurderinger. Det kan være det høyeste punktet i terrenget, et punkt der brannvann skal tas ut eller et punkt der kapasiteten på rør er lav.

I sone SO01 er det kritiske punktet en pumpestasjon som krever 18 meters trykkehøyde for å kunne driftes normalt.

I sone SO14 er det kritiske punktet et tilkoblingspunkt høyt i sonen, her må trykket være på 42 m for å sikre et levert trykk på 20 m til abonnent som ligger på 80 m. Dette er abonnenten på høyeste kotehøyde i sonen.

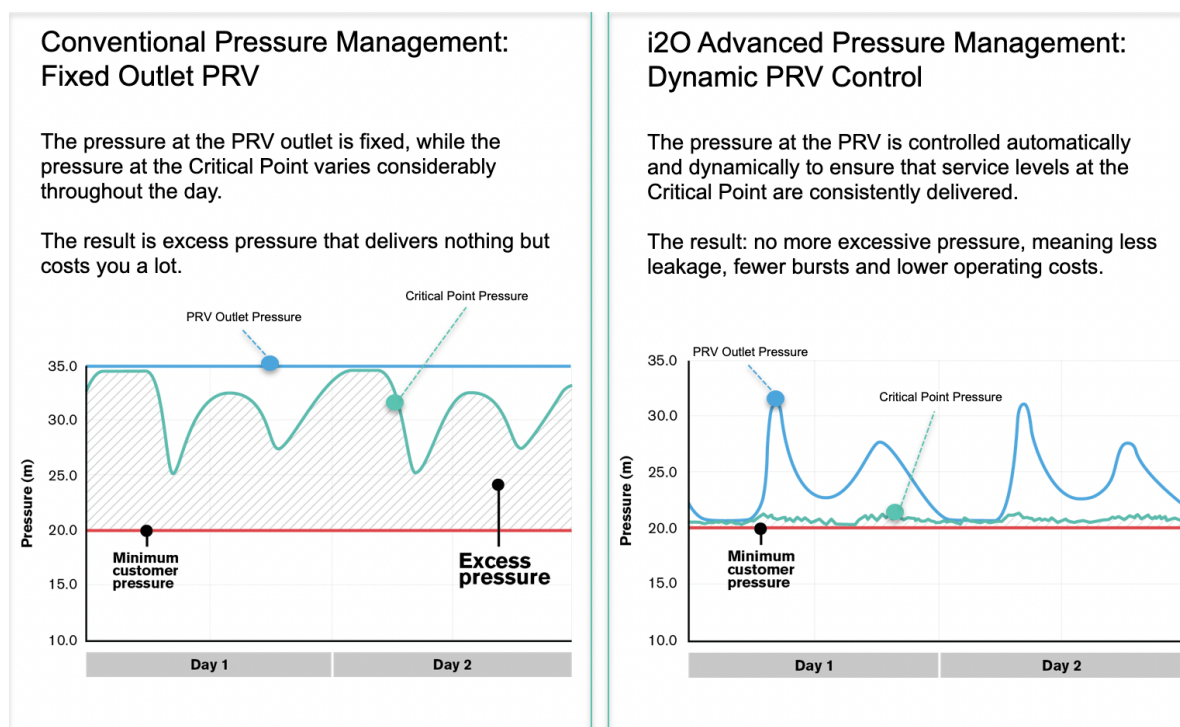
### 3.3 Simuleringer av ulike trykkstyringsregimer i MIKE+

Når modellens forbrukskurve stemte overens med målt forbrukskurve, kunne simuleringen av ulike trykkstyringsregimer begynne.

Ulike innstillinger for trykkreduksjonsventilen ble så simulert, med forbruksmodulert trykk og ulike faste utgangstrykk. Ved å sammenligne forbruket før og etter trykkendring kan lekkasje beregnes.

#### 3.3.1 Forbruksmodulert trykk med kritisk node

Denne typen trykkstyring styrer trykkreduksjonsventilen etter behovet ved kritisk node. I motsetning til tilfellet der trykkreduksjonsventilen har et fast utgangstrykk og trykket i kritisk node varierer med forbruk, vil trykket i kritisk node med denne innstillingen være fast, mens utgangstrykket til reduksjonsventilen vil variere med forbruket. Hvis trykket kan holdes stabilt ved kritisk node, heller enn å svinge slik at man tidvis har et unødvendig høyt trykk, kan den trykkavhengige lekkasjen reduseres, som vist i eksempel fra i2O i figur 3.4.



Figur 3.4: Fast vs. dynamisk trykkstyring (Gori, 2015)

For å unngå svingninger i trykket hos abonnent eller ved kritisk node må trykkreduksjonsventilen styres etter en forbrukskurve. Målet med denne forbrukskurven er å motvirke effekten av trykktap, for jo høyere forbruket er jo høyere er trykktapet. Dette vil normalt sett føre til svingninger i trykket ved kritisk node.

For å sette opp denne kurven er det tatt utgangspunkt i energilikningen.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho * g} - H_L(Q) = Z_2 + \frac{P_2}{\rho * g} \quad (3.3)$$

$Z_1$  = høyde ved trykkreduksjonsventil (m)

$P_1$  = trykk ved trykkreduksjonsventil (Pa)

$H_L(Q)$  = trykktapet som funksjon av forbruk (m)

$Z_2$  = høyde ved kritisk node (m)

$P_2$  = trykk ved kritisk node (Pa)

$\rho * g$  = vannets tetthet \* gravitasjonskonstant =  $1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{N}{kg}$

Siden  $P_2$  skal holdes konstant settes denne alene.

$$\frac{P_2}{\rho * g} = Z_2 - Z_1 - \frac{P_1}{\rho * g} + H_L(Q) \quad (3.4)$$

For å finne  $H_L(Q)$  må man finne differansen mellom trykkehøyden ved trykkreduksjonsventilen og trykkehøyden ved kritisk node for de ulike forbruksverdiene. Dette ble gjort ved hjelp av modellen i MIKE+.

### 3.3.2 Følsomhetsanalyse

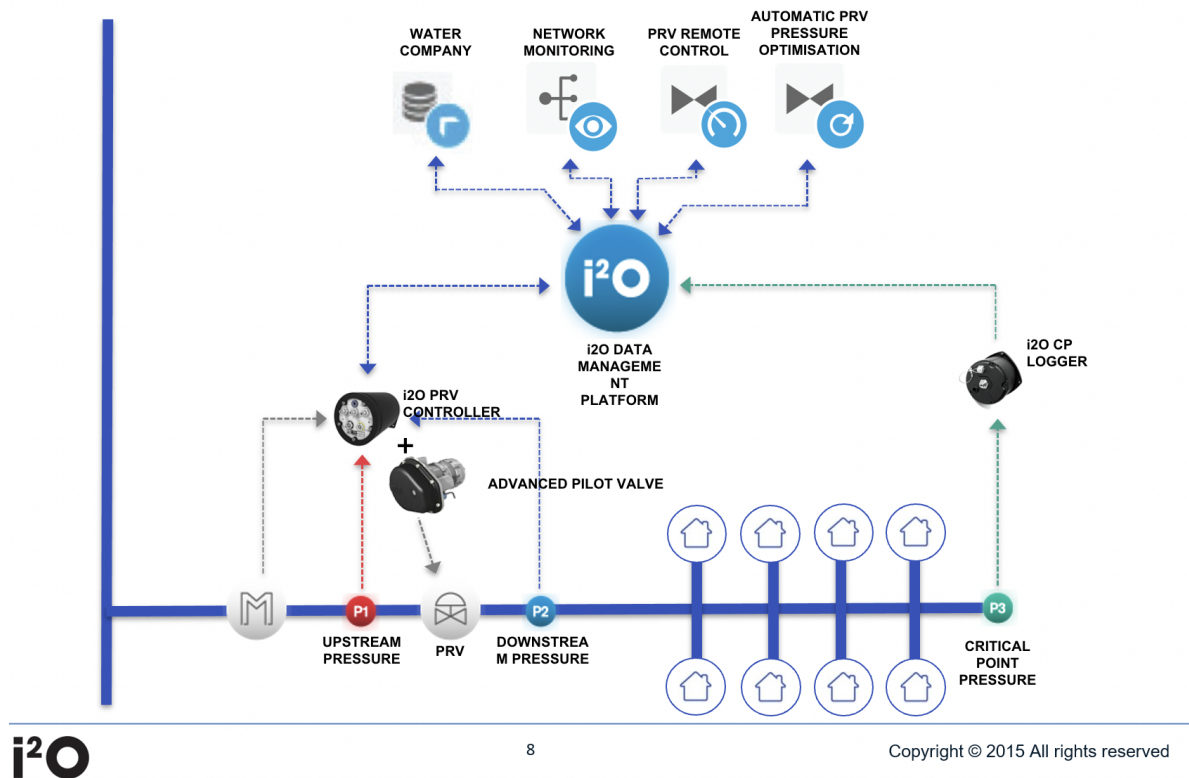
Det er som tidligere nevnt knyttet usikkerhet til den trykkavhengige lekkasjen og N1-verdien. En følsomhetsanalyse med bruk av ulike N1-verdier vil bli gjennomført for å se i hvor stor grad denne påvirker lekkasjevolumet.

I utgangspunktet er det satt opp et antall emittere i begge soner, disse følger likning 3.2. Ved å endre på verdier for K og N1 kan det undersøkes hvor stor effekt trykkendring har for ulike sammenhenger mellom trykk og lekkasje. Det totale lekkasjevolumet endres ikke, og derfor behøves det en endring av koeffisienten K for hver endring av eksponenten N1 for å forsikre at det målte forbruket stemmer overens med det modellerte forbruket.

## 3.4 Dynamisk trykkstyring med i2O

i2O er leverandør av elektronisk styrt trykkreduksjonsventiler som Bergen kommune har tatt i bruk i de to forsyningssonene. i2O-systemet installeres og lærer seg hvordan trykktap varierer med forbruk ved hjelp av deres algoritme. Etter omtrent 7 dager hevdes det av leverandøren at systemet har lært seg denne sammenhengen og styrer

## Pressure Optimisation on PRVs



Figur 3.5: System fra i2O (Gori, 2015)

trykkreduksjonsventilen slik at trykket ved kritisk node holder seg stabilt rundt det påkrevde trykket. Dette systemet består hovedsakelig av tre komponenter som vist i figur 3.5: en logger, en kontroll og en reduksjonsventil. Det fungerer ved at det blir plassert ut en logger i forsyningssonen ved et kritisk punkt, der den måler trykk. Denne dataen blir så sendt til en kontroll som sammen med en aktuator styrer reduksjonsventilen. Heller enn at trykket ut av ventilen er fast, vil det variere i forhold til behovet ved det kritiske punktet. Ved høyt forbruk i sonen vil også trykket ut av reduksjonsventilen være høyere, og motsatt ved lavt forbruk.

Systemet kan altså bli satt til å styre trykket etter hva som er påkrevd i det kritiske punktet, med mål om at trykket ikke skal være høyere enn det som er påkrevd i dette punktet. Når trykket i kritisk punkt faller, vil også trykket i resten av forsyningssonen falle. Ved lavere trykk i sonen kan også lekkasjevolumet i sonen reduseres.

For denne oppgaven ble systemet fra i2O installert i de to forsyningssonene Nestun og Storetveit i Bergen kommune. Kommunen har tidligere (2015-2019) gjennomført et pilotprosjekt med dette systemet. Resultatene fra prosjektet var positive, men det påpekes at erfaringen med bruk av systemet er kort (Flatlin mfl., 2021).

Loggerene er installert i samme kritiske punkter som brukt i den hydrauliske modellen



slik at det blir mulig å sammenligne resultatene. De ble plassert ut og startet logging i slutten av april 2023. Perioden med datainnsamling var fra 28.04.23 til 15.05.23.



**Figur 3.6:** Trykkreduksjonsventil med aktuator fra i2O

### 3.5 Kost-nytte-analyse

For å gjøre en kost-nytte-analyse av trykkstyringssystemet fra i2O og de simulerte trykkinnstillingene, er det innhentet data fra de fem siste årene over de variable kostnadene i forbindelse med vannforsyning til sone SO01 og SO14.

Disse kostnadene er energikostnader til vannbehandling og til pumping av vannet ut til abonnenter, i tillegg til kjemikaliekostnader som behøves til behandling av råvannet. Øvrige kostnader i forbindelse med vannforsyning er vurdert som faste og vil ikke variere med variasjoner i produksjonen av forsyningsvann. Dette er for eksempel husleie, lønn til personell, innkjøp av utstyr, kjøring etc.

I tillegg tilkommer kostnader som følge av at en andel forsyningsvann lekker inn på avløpsnett og går til rensing ved renseanlegg. Det er lagt til grunn at 50% av vannet som lekker ut av vannledninger går til avløpsledninger i samsvar med Lindholm mfl. (2012). Alle disse kostnadene bidrar til marginalkostnaden for en kubikkmeter vann.

Når denne kostnaden er funnet er det mulig å anslå hvor mye man kan spare på en reduksjon av trykk og lekkasje, slik som vist i tabell 3.2.

Begge forsyningssonene får vann fra Espeland og Svartediket VBA, vannet lagres så i høydebasseng ved Fantoft. Det er ulike høydeforskjeller i de to sonene, og i sone SO01 er det to pumpestasjoner, men ingen i SO14.

**Tabell 3.2:** Variable kostnader vannforsyning

Marginalkostnader forsyningsvann SO01	Totalt
Trykkendring (bar)	
Reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /t)	
Kostnader vannbehandling	
<b>VBA Svartediket</b>	
Kjemikalier (NOK)	
Energi (NOK)	
<b>VBA Espeland</b>	
Kjemikalier (NOK)	
Energi (NOK)	
Total for behandling (NOK)	
Kostnader ditribusjon	
PS1	
Energi til pumping (NOK)	
PS2	
Energi til pumping (NOK)	
Kostnader avløpsrensing	
<b>Flesland RA</b>	
Energi (NOK)	
Kjemikalier (NOK)	
Fremmedvann (NOK)	
Totale marginalkostnader forsyningsvann	
Totalt volum vann inn i sone (m <sup>3</sup> )	
Kostnad per kubikkmeter vann (NOK/m <sup>3</sup> )	
<b>Besparelse ved trykkreduskjon (NOK)</b>	

På kostnadssiden har man investeringskostnadene for systemet og en abonnementsløsning for i2O-systemet. Trykkstyringssystemet har en investeringskostnad og en levetid på et visst antall år, det må derfor gjøres nåverdiberegning av investeringen.

Nåverdi for en investering:

$$P = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} \quad (3.5)$$

hvor,

CF<sub>0</sub>= Investeringskostnad

CF<sub>n</sub>= Kontantstrøm i år n

r= avkastning

n= antall år (levetid)

Kontantstrømmen CF<sub>n</sub> blir i denne oppgaven det samme som årlig besparelse grunnet trykkreduksjon. Verdien til r vil avhenge av hvilken rente man krever eller ønsker.

Samlet sett er det faktorer ved et slikt prosjekt som kommunen kan spare penger på, men det innebærer også kostnader, dette er i hovedsak de som er listet opp under.

Nytte:

- Reduksjon i variable kostnader ved produksjon og distribusjon av drikkevann
- Reduksjon i rensing av avløpsvann (mindre lekkasje inn på avløpsledninger)
- Redusert bruddfrekvens

Kostnader:

- Investering
- Abonnement og servicegebyr for i2O-tjenesten

### 3.5.1 Følsomhetsanalyse

Det kan være stor usikkerhet knyttet til kostnadene, og spesielt har strømprisene variert de siste årene. Dette kan ha stor innvirkning på regnestykket og det vil derfor bli gjort beregninger med bruk av ulike strømpriser.



## 4. Resultater

### 4.1 Beregninger av lekkasje-MNF

Lekkasjen i sonene er beregnet ved MNF-metoden. Differansen mellom observert og beregnet forbruk om natten er unngåelig tap, og vist for de to forsyningssonene i 4.2 og 4.3.

**Tabell 4.1:** Data for beregninger

<b>Lm SO01 (m)</b>	21114
<b>Lc privat SO01 (m)</b>	32505
<b>Nc SO01</b>	1695
<b>P SO01 (m)</b>	54,15
<b>Lm SO14 (m)</b>	31354
<b>Lc privat SO14 (m)</b>	71447
<b>Nc SO14</b>	3056
<b>P SO14(m)</b>	44
<b>Beboere SO01</b>	5621
<b>Beboere SO14</b>	9380

De ulike forbrukskategoriene er oppsummert i tabell 4.2 og 4.3.

**Tabell 4.2:** MNF SO01

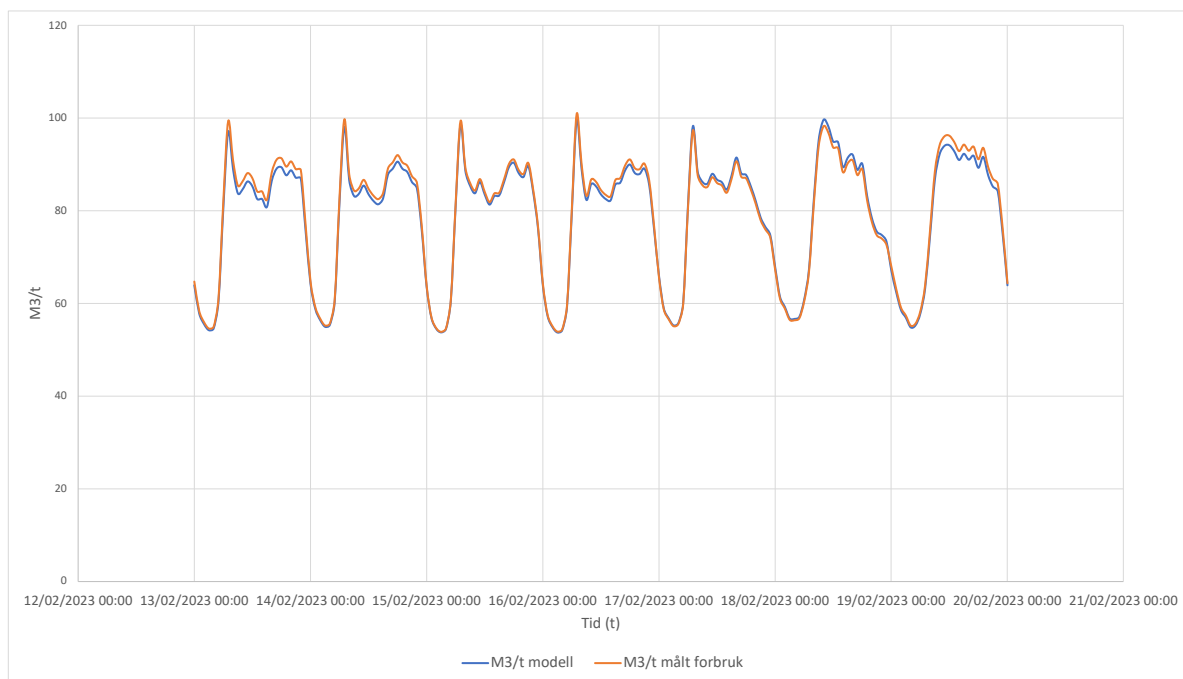
Forbrukstype natt SO01	Forbruk (m <sup>3</sup> /h)
Gjennomsnittlig nattforbruk husholdning	3,37
Gjennomsnittlig nattforbruk industri	2,6
Totalt gjennomsnittlig nattforbruk	6,0
Unngåelig bakgrunnslekkasje (UBL)	3,76
Beregnet minimalt nattforbruk (MNF)	10,0
Observert minimalt nattforbruk	54,6
Unngåelig tap (lekkasje)	44,8

**Tabell 4.3:** MNF SO14

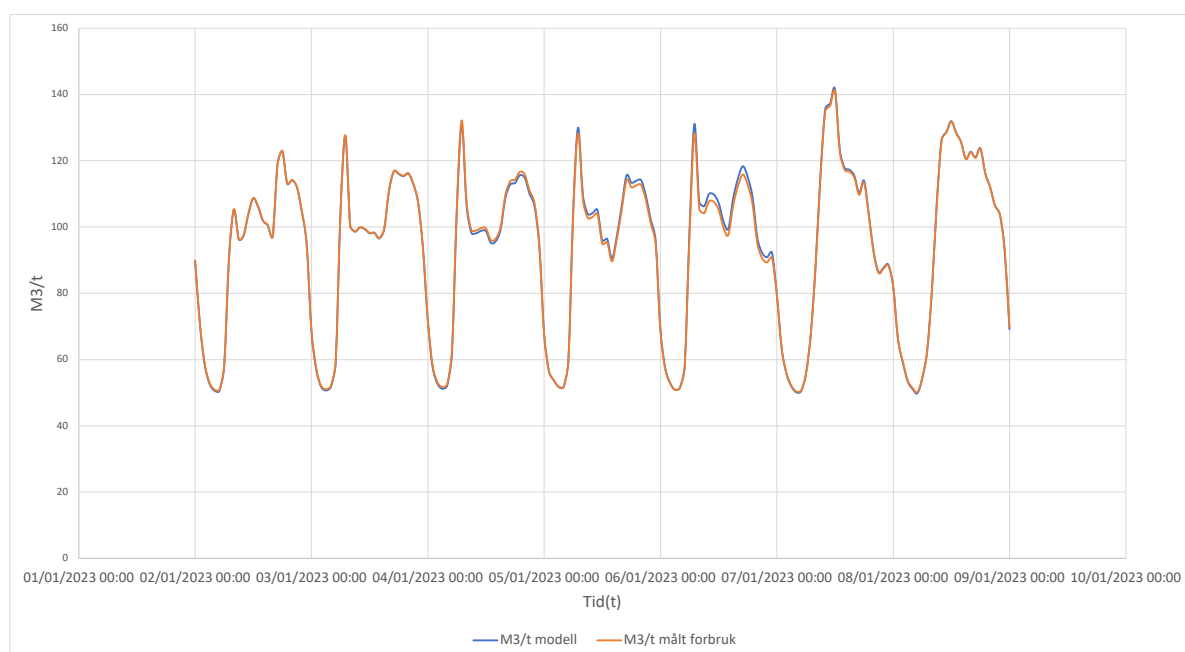
Forbrukstype natt SO14	Forbruk (m <sup>3</sup> /h)
Gjennomsnittlig nattforbruk husholdning	5,6
Gjennomsnittlig nattforbruk industri	2,6
Totalt gjennomsnittlig nattforbruk	8,2
Unngåelig bakgrunnslekkasje (UBL)	6,412
Beregnet minimalt nattforbruk (MNF)	14,6
Observert minimalt nattforbruk	50,2
Unngåelig tap (lekkasje)	35,6

## 4.2 Simuleringer i MIKE+

I denne delen vil resultater fra simuleringer i MIKE-modellen presenteres. Det vil også vises en følsomhetsanalyse for å vurdere effekten av endringer på parametre med usikkerhet knyttet til seg.



**Figur 4.1:** Forbruk observert og i modell SO01 før aktiv trykkstyring



**Figur 4.2:** Forbruk observert og i modell SO14 før aktiv trykkstyring

### 4.3 Trykksenkning i sone SO01

I figur 4.1 vises forbrukskurven for forsyningssonen fra modell og fra SCADA-systemet. Kurven viser tydelig forbruksmønsteret med topper på morgen og kveld, men noe jevnere forbruk i helgen. I denne forsyningssonen er det kritiske punktet en pumpestasjon

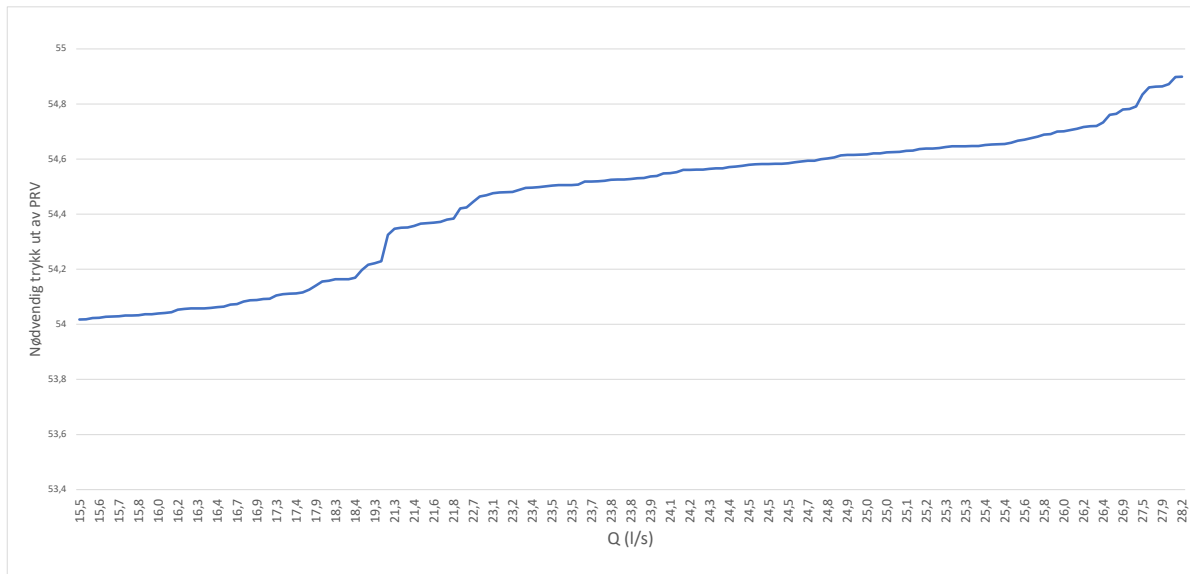
som krever 18m trykk for å driftes normalt. Med nåværende faste utgangstrykk på reduksjonsventilen (54,15 m) i sonen er trykket ved det kritiske punktet på 18-19 meter, men trykket faller ved høyt forbruk, som vist i figur 4.5. Det er en trykkdifferanse på 1-2 meter mellom natt og dag. En økning av trykket på omtrent 0,6 bar, til 60 meter resulterer i et høyere trykk ved kritisk punkt, på omtrent 24 meter.

En forbruksmodulert kurve er laget ved hjelp av MIKE+ for å utjevne trykkforskjellene over døgnet på grunn av variasjon i forbruk, vist i figur 4.3. Trykket ut av reduksjonsventilen øker med økt forbruk, fordi trykktapet også øker. Den forbruksmodulerte kurven er laget ved bruk av likning 3.4. I figur 4.5 vises det at styring av trykkreduksjonsventilen ved hjelp av denne kurven resulterer i et mer stabilt trykk ved den kritiske noden, som forventet ut fra teorien. Dette trykket er noe høyere enn det nåværende trykket, som ligger svært nært og til tider under det ønskede trykket på 18 meter. Det er mulig å senke dette trykket ytterligere, men på grunn av fare for kavitasjon i pumpen ønskes det en sikkerhetsmargin.

I figur 4.4 vises avvik fra nåværende forbruk i sonen ved forbruksmodulert trykkstyring og høyere faste trykk. Dette gir en kurve som varierer med tiden, men som gir et høyere forbruk enn hva man har i nåværende situasjon. Denne differansen i forbruk skyldes trykkavhengig lekkasje som er lagt inn i modellen ved bruk av emittere. En reduksjon i forbruk blir derfor det samme som en reduksjon i lekkasje i sonen.

Det blir altså et høyere lekkasjevolum i forsyningssonen med en forbruksmodulert styring, og nåværende trykk er svært tett på og noen ganger under det påkrevde trykket i den kritiske noden. Å benytte forbruksmodulert trykkstyring når eksisterende trykkstyring allerede ligger så tett på grensen til hva som er påkrevd vil kanskje derfor ha en negativ effekt. For figurene 4.3, 4.4 og 4.5 er det benyttet en N1-verdi på 0,5 og en koeffisient K på 0,0067 for emitter-funksjonen.

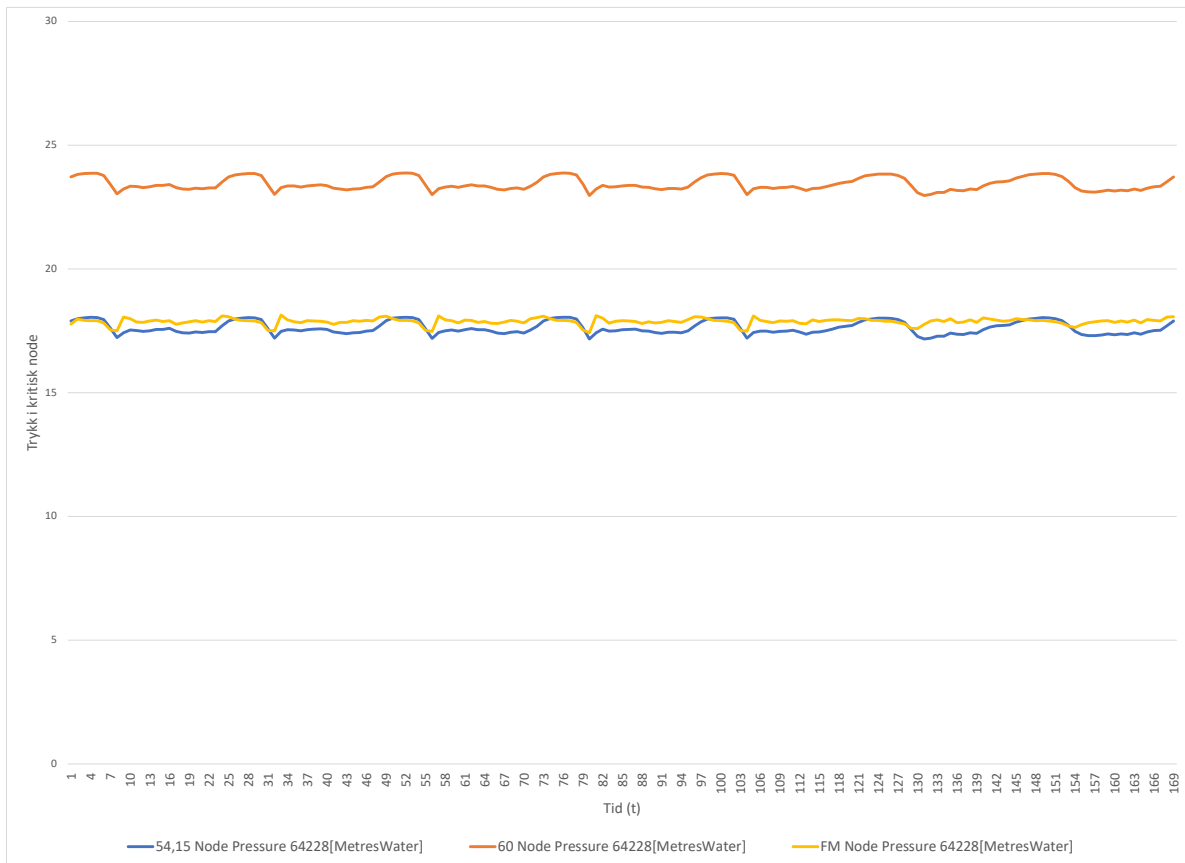




Figur 4.3: Forbruksmodulert kurve i SO01



Figur 4.4: Endring i forbruk SO01



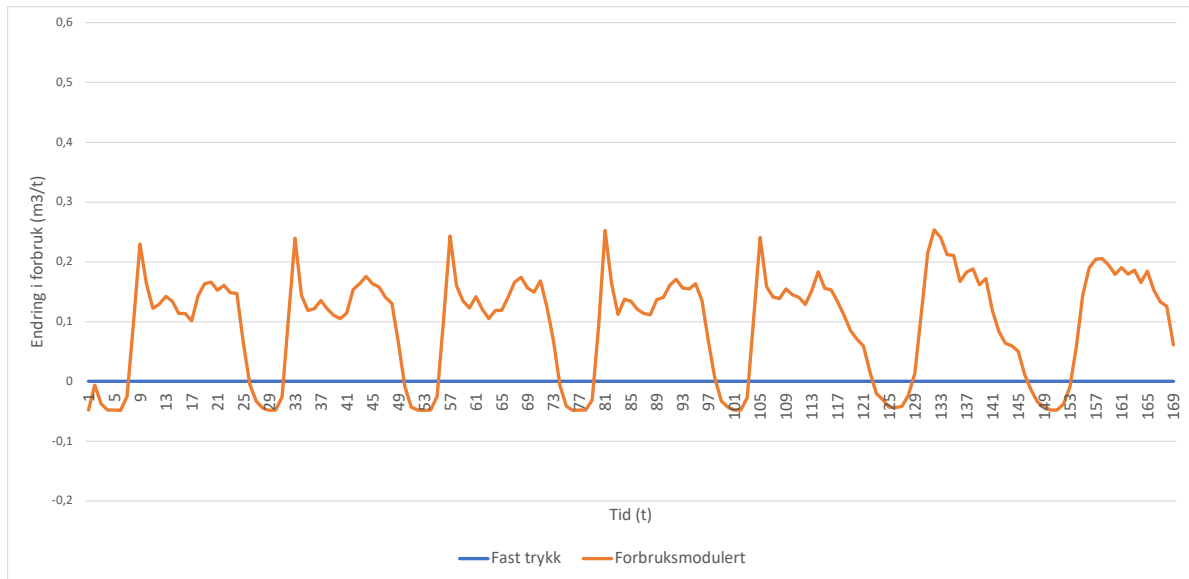
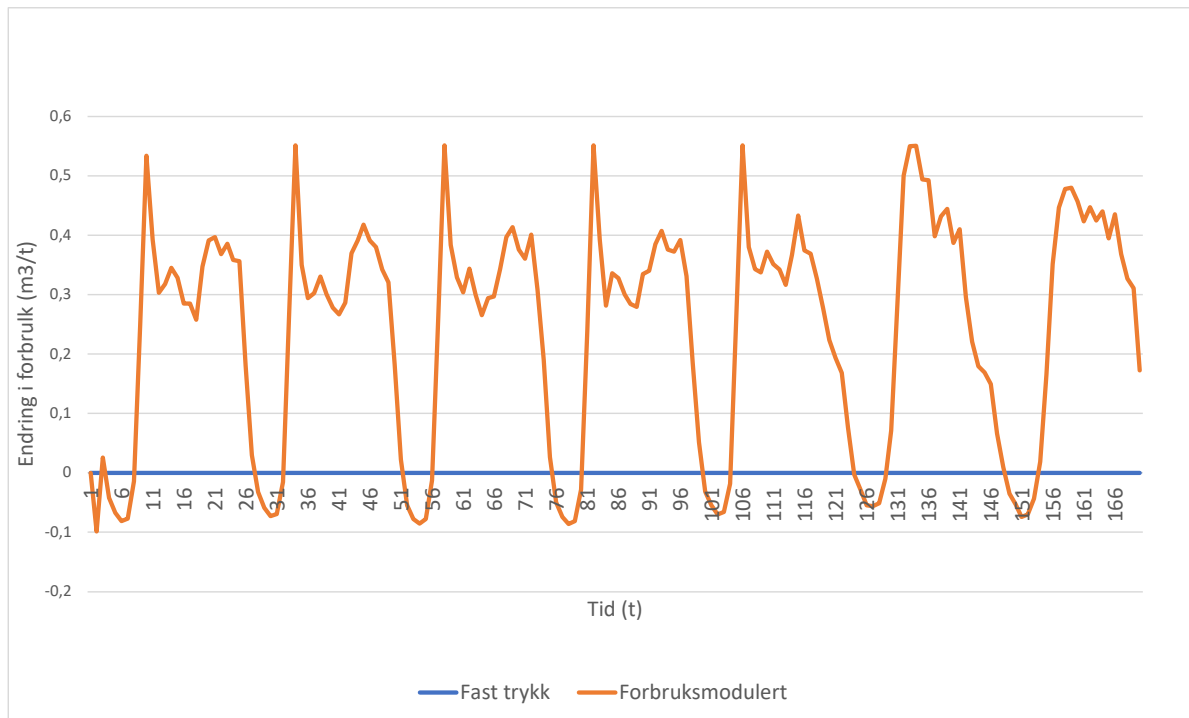
Figur 4.5: Trykk ved kritisk node i modell SO01

### 4.3.1 Følsomhetsanalyse

Ved å endre på  $N_1$ -verdien fra 0,5 og opp til 1,5 kan det vurderes om trykksenkning vil ha bedre effekt dersom lekkasjene er mer følsomme for trykk. For å gjøre dette er det endret på verdier i likning 4.1. Opprinnelig ble det benyttet en verdi for  $k$  på 0,0067 og  $N_1$  på 0,5.

$$Q = K * P^{N_1} \quad (4.1)$$

Figur 4.6 viser endringen i forbruk ved forbruksmodulert kurve når  $N_1=0,5$ .

**Figur 4.6:** N1=0,5**Figur 4.7:** N1=1

Som vist i figur 4.7 gjør en endring av verdien N1 til 1 og K til 0,0009105 i denne sonen at det blir større differanse mellom dagens situasjon og med forbruksmodulert trykkstyring. Det blir en større reduksjon i forbruk om natten når forbruket er lavt, men også en større økning i forbruk når forbruket (og trykket) er høyt.

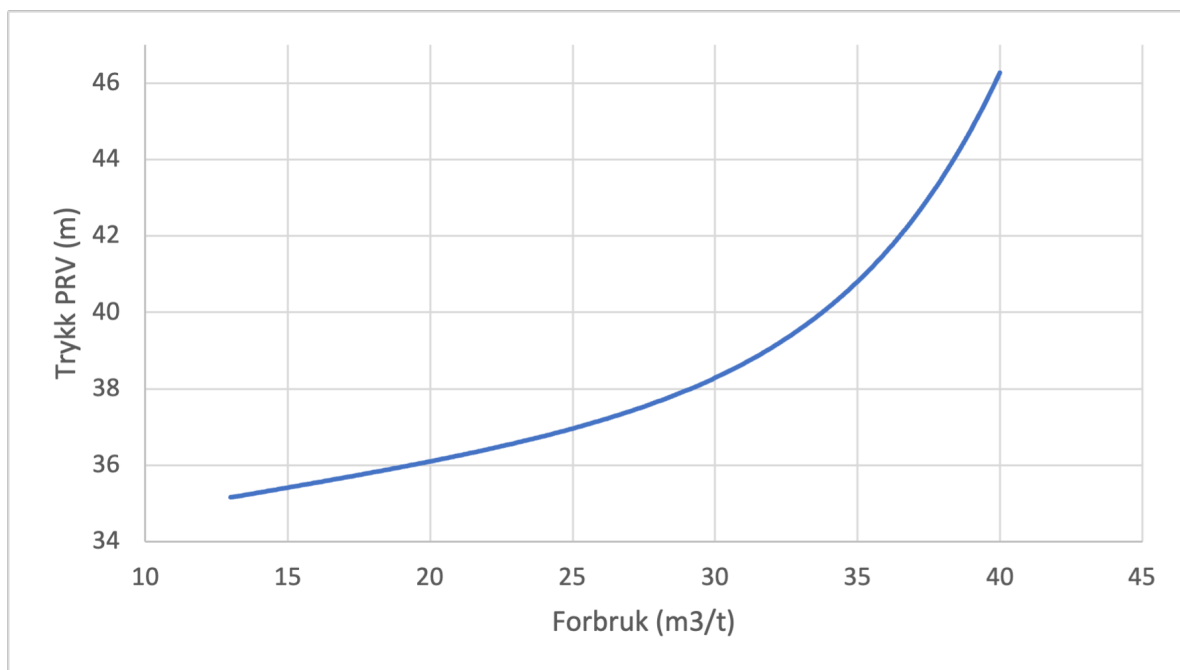
## 4.4 Trykksenkning i sone SO14

I figur 4.2 vises forbruk i modell og SCADA-systemet. Forbruket her er høyere enn i SO01 siden det er et større antall abonnenter her.

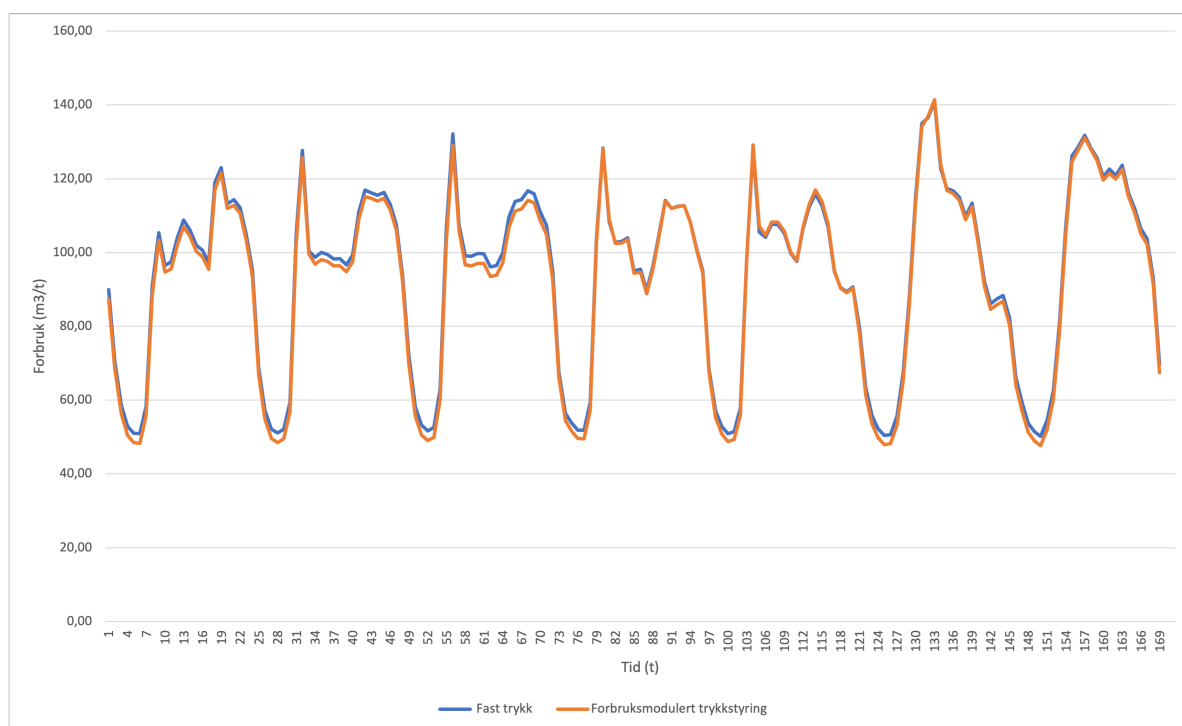
I denne sonen er en hydrant valgt som kritisk punkt. Det minimale trykket her er 42 meter, det er for å sikre tilstrekkelig trykk til en abonnent som ligger på 80 meters høyde, og er sonens høyeste punkt.

I nåværende situasjon er utgangstrykket fra reduksjonsventilen på 44 meter, som gir et trykk på omtrent 48 meter ved kritisk punkt (gul linje i figur 4.10). Det er altså mulig å senke trykket her med 6 meter i gjennomsnitt, og fortsatt tilfredstille krav om trykk til abonnenten som ligger høyt i sonen. Man ser også at den forbruksmodulerte trykkkurven oppfører seg motsatt av kurven med fast trykk. Trykket synker om natten og øker tydelig om morgenen der forbruket er høyt.

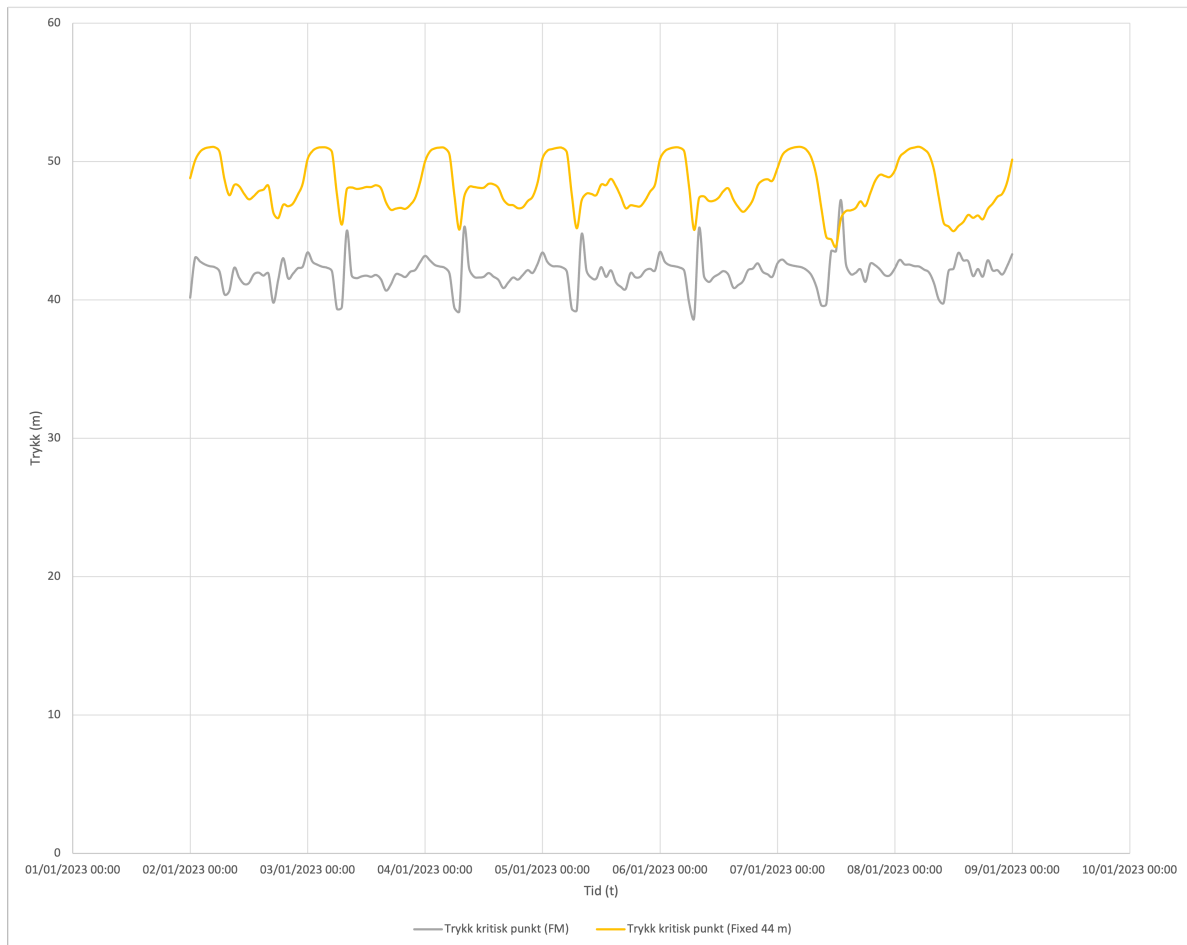
Ved å bruke forbruksmodulert trykkstyring kan trykket senkes til 42 meter i kritisk node. Den forbruksmodulerte kurven er vist i figur 4.8. Denne kurven er basert på samme likning som FM-kurven i sone SO01, men ved å bruke trendlinje i Excel med polynomfunksjon og prøving og feiling i MIKE+ for å få trykket ved kritisk node så stabilt som mulig viste denne seg å fungere godt. Dette gjør at lekkasjen i sonen reduseres gjennomsnittlig med omtrent  $1,46 \text{ m}^3$  per time, forbruket med fast trykk og forbruksmodulert styring er vist i figur 4.9. Hvor mye forbruket ved forbruksmodulert styring avviker fra nåværende situasjon avhenger av tiden på døgnet. De største avvikene er om natten, da forbruket er lavest.



Figur 4.8: Forbruksmodulert kurve SO14



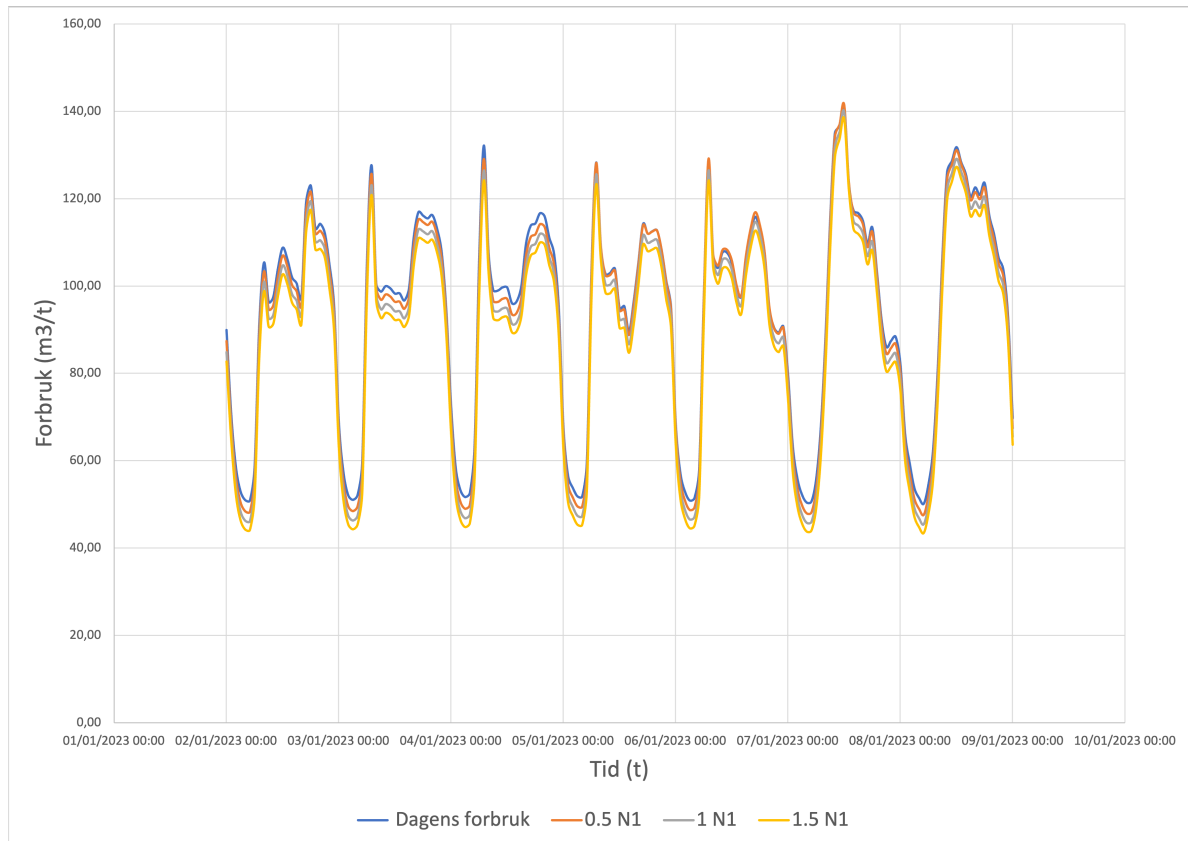
Figur 4.9: Endring i forbruk SO14



**Figur 4.10:** Trykk ved kritisk node i modell SO14

#### 4.4.1 Følsomhetsanalyse

For sone SO14 er det brukt samme metode som for sone SO01 for å vurdere hvor stor innvirkning endring av  $k$ - og  $N1$ -verdier har på lekkasjevolumet. I denne sonen var  $k$ - og  $N1$ -verdier på henholdsvis 0,00353 og 0,5.



**Figur 4.11:** Forbruk ved ulike verdier av N1

I figur 4.11 vises det en større reduksjon i forbruk med en N1-verdi på 1 enn på 0,5. Her er en gjennomsnittlig reduksjon på  $3,62 m^3$  per time kontra  $1,46 m^3$  per time ved N1-verdi på 0,5. Øker man N1-verdien til 1,5 blir den tilsvarende reduksjonen i gjennomsnittlig forbruk  $5,61 m^3$  per time.

At forbruket (lekkasjen) reduseres ytterligere ved høyere N1-verdi viser at jo mer sensitiv lekkasjen er for trykk, jo større potensiale er det i trykksenkning.

## 4.5 Kostnadsanalyse

Begge sonene får vann fra Svartediket og Espeland behandlingsanlegg. Strøm- og kjemikalieforbruk fra disse anleggene, i tillegg til pumpestasjoner og avløpsrenseanlegg er hentet og fordelt på hver sone. SO01 har to pumpestasjoner, mens SO14 ikke har noen. Begge sonene fører avløp til Flesland renseanlegg. Det antas at 50% av lekkasje går til avløpsledninger. Lekkasje fra vannledningene fører da også til en kostnad i form av strøm og kjemikalier brukt til å rense avløpsvannet. I SO01 er det tidligere vist at det ikke er et betydelig potensial for trykksenkning, og derfor er kostnadsanalysen satt opp med besparelser man ville hatt om trykket i sonen var høyere enn hva det faktisk er.

I tabell 4.5 og 4.4 vises utregning av marginalkostnaden for en kubikkmeter vann og besparelsene ved lekkasjereduksjon. I SO01 er marginalkostnaden for forsyningsvann beregnet til 5,73 NOK/m<sup>3</sup>, mens den i SO14 er beregnet til 4,85 NOK. I tabellene 4.5 og 4.4 er kostnadene for vannbehandling fordelt likt på begge sonene. Kostnaden lekkasjen utgjør som fremmedvann til renseanlegg er beregnet ved å dividere totale kostnader ved renseanlegget på total mengde vann inn i sonen (antar at mengden vann inn til rensing er lik den inn i sonen) og multiplisere dette med halvparten av lekkasjereduksjonen. I SO14 vil man, med en trykkendring på omtrent 0,6 bar, totalt kunne spare 62 030 NOK/ år. Dette er forutsatt en strømpris på 1 kr/kWt og en N1-verdi på 0,5. I SO01 vil man, med en teoretisk trykkendring fra 60 meter til 54,15 m, som utgjør omtrent 0,6 bar spare 100 000 NOK/år.

**Tabell 4.4:** Marginalkostnader SO14

<b>Marginalkostnader forsyningsvann SO14</b>	Totalt
Trykkendring (bar)	0,6
Reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /h)	1,46
Årlig reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /år)	12790
Kostnader vannbehandling	
<b>VBA Svartediket</b>	
Kjemikalier	NOK 1 520 911,00
Energi	NOK 4 216 417,00
<b>VBA Espeland</b>	
Kjemikalier	NOK 1 286 655,00
Energi	NOK 794 184,00
<b>Total for behandling</b>	<b>NOK 3 909 083,50</b>
<b>Kostnader avløpsrensing</b>	
Flesland RA	
Energi	NOK 3 643 543,00
Kjemikalier	NOK 1 009 941,00
<b>50% innlekket vann</b>	<b>NOK 35 069,12</b>
Totalt volum vann inn i sone (m <sup>3</sup> )	813683
Kostnad per kubikkmeter vann (NOK/m <sup>3</sup> )	NOK 4,85
<b>Årlig besparelse ved trykkreduskjon</b>	<b>NOK 62 030</b>



Tabell 4.5: Marginalkostnader SO01

<b>Marginalkostnader forsyningsvann SO01</b>	Totalt
Trykkendring (bar)	0,6
Reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /t)	2
Årlig redksjon lekkasje(m <sup>3</sup> /år)	17520
Kostnader vannbehandling	
<b>VBA Svartediket</b>	
Kjemikalier	NOK 1 520 911,00
Energi	NOK 4 216 417,00
<b>VBA Espeland</b>	
Kjemikalier	NOK 1 286 655,00
Energi	NOK 794 184,00
<b>Total for behandling</b>	<b>NOK 3 909 083,50</b>
Kostnader ditribusjon	
<b>PS1</b>	
Energi til pumping	NOK 8 669,00
<b>PS2</b>	
Energi til pumping	NOK 10 779,00
<b>Kostnader avløpsrensing</b>	
Flesland RA	
Energi	NOK 3 643 543,00
Kjemikalier	NOK 1 009 941,00
<b>50% innlekket vann</b>	<b>NOK 58 551,71</b>
Totalt volum vann inn i sone (m <sup>3</sup> )	696214
Kostnad per kubikkmeter vann (NOK/m <sup>3</sup> )	NOK 5,73
<b>Årlig besparelse ved trykkreduskjon</b>	<b>NOK 100 333,66</b>

## 4.6 Følsomhetsanalyse

Tall hentet inn fra Bergen kommune viser både strømforbruk og strømutgifter for perioden 2018-2022. Dette er vist i tabell 4.6 der tall fra Svartediket VBA er brukt som eksempel. Ved å dividere kostnader (NOK) på forbruk (kWt) ser man at kostnaden per forbruk varierer i de forskjellige årene. Gjennomsnittet er på omtrent 1,1 NOK/kWt, men det har vært en svært stor endring i strømpriser i 2022 og derfor kan det være nyttig å se på besparelsene man har av trykksenkning ved de ulike strømprisene. Det vil derfor bli gjennomført beregninger av de ulike resultatene ved strømpris på 80 øre, 1 kr og 2 kr per kilowatttime.

Strømprisen vil bli kombinert med ulike N1-verdier for å vurdere 3 ulike scenarier. Føl-

somhetsanalysen tar kun for seg SO14, da SO01 ikke er velegnet for ytterligere trykksenkning.

**Tabell 4.6:** Strømforbruk- og utgifter Svartediket VBA

År	kWt	NOK	NOK/kWt
2018	3410965	3 047 569	NOK 0,89
2019	4212215	3 228 806	NOK 0,77
2020	4212215	1 822 396	NOK 0,43
2021	3884096	5 147 144	NOK 1,33
2022	3865661	7 836 171	NOK 2,03
			Snitt: NOK 1,09

### 4.6.1 Beregninger for 3 ulike scenarier

#### Lav strømpris, N1=0,5

Med en strømpris på 80 øre/kWt blir marginalkostnaden for en kubikkmeter vann på 4,22 NOK. Reduksjonen i lekkasje med en N1-verdi på 0,5 er på 1,46  $m^3$  per time. Dette utgjør totalt en årlig besparelse på omtrent 54 000 NOK.

#### Gjennomsnittlig strømpris, N1=1

Med en strømpris på 1 NOK/kWt blir marginalkostnaden for en kubikkmeter vann på 4,89 NOK. Reduksjonen i lekkasje med en N1-verdi på 1 er på 3,62  $m^3$  per time. Dette utgjør totalt en årlig besparelse på omtrent 155 000 NOK.

#### Høy strømpris, N1=1,5

Med en strømpris på 2 NOK/kWt blir marginalkostnaden for en kubikkmeter vann på 8,13 NOK. Reduksjonen i lekkasje med en N1-verdi på 1,5 er på 5,61  $m^3$  per time. Dette utgjør totalt en årlig besparelse på omtrent 400 000 NOK.

I tabell 4.7 er det satt opp de ulike kombinasjonene av strømpriser og N1-verdier.

**Tabell 4.7:** Kombinasjoner av strømpriser og N1-verdier

Strømpris	N1=0,5	N1=1	N1=1,5
0,8 NOK/kWt	NOK 53 973,80	NOK 62 543,10	NOK 103 982,70
1 NOK/kWt	NOK 133 820,42	NOK 155 066,79	NOK 257 810,43
2 NOK/kWt	NOK 207 387,68	NOK 240 314,16	NOK 399 540,72

## 4.7 Resultater fra i2O

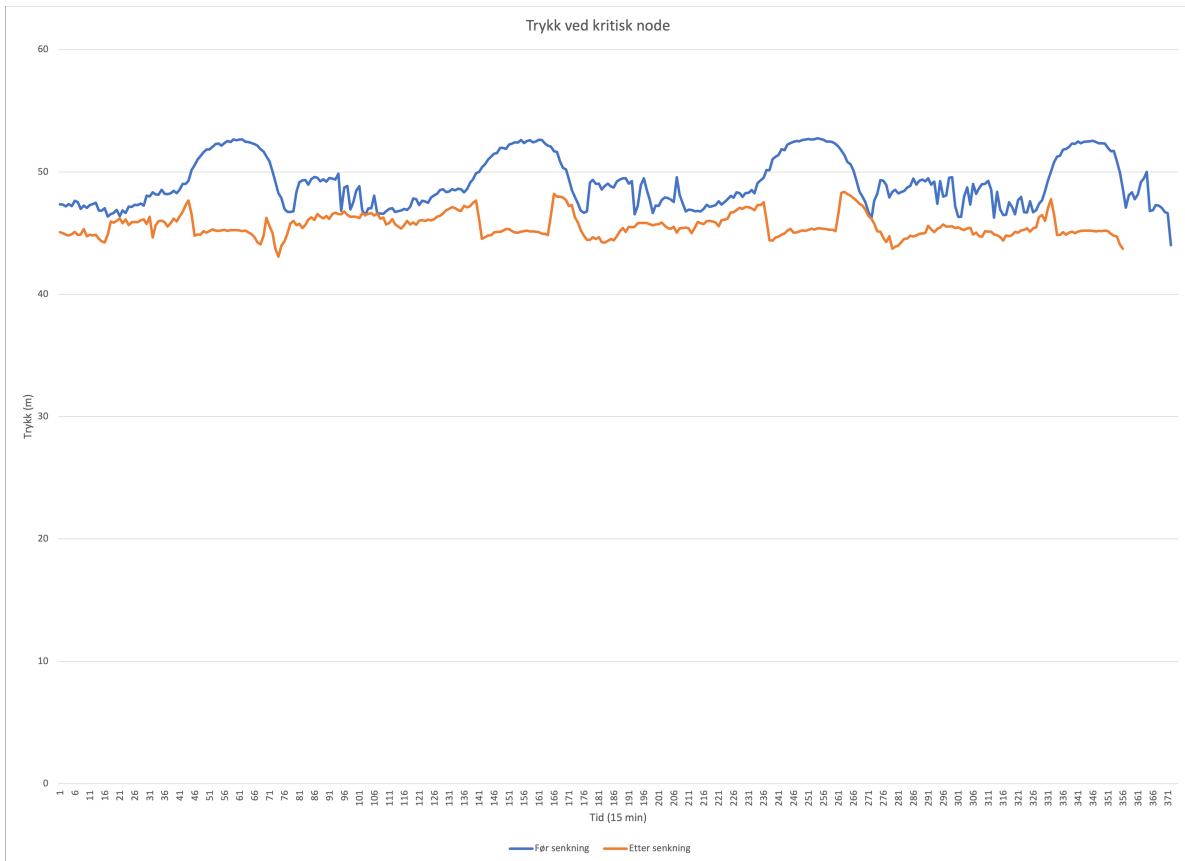
Bergen kommune ønsket i oppstartsfasen å bruke systemet fra i2O i SO14 til å holde et stabilt trykk ved kritisk node på 42 m om dagen (06.00-00.00) og 37 m om natten (00.00-

06.00). Dette er fordi de regner med at trykket kan settes ytterligere ned om natten uten å motta klager fra abonnenter på for lavt trykk. Etter at systemet fra i2O var satt opp ble det forsøkt noen netter med nattsenkning, der trykket ut fra reduksjonsventilen ble satt til bestemte nivåer på natten og på dagen i håp om at dette skulle gi et lavere trykk ved kritisk node.

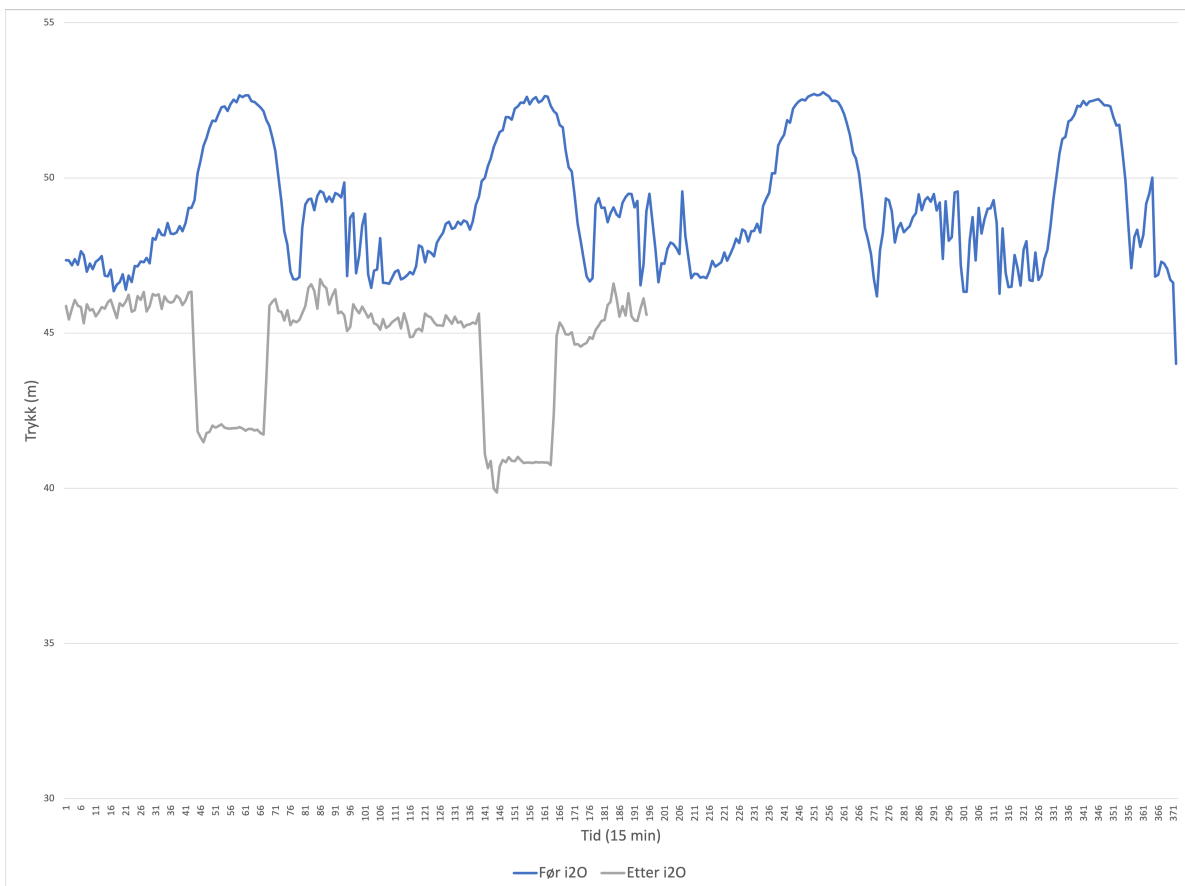
I figur 4.12 vises trykket ved kritisk node før og etter nattsenkning. Man ser at trykket er redusert, og at mønstrene i de to styringsregimene er motsatte. Dette skyldes at trykket settes ned om natten, når forbruket er lavt. Dette er i motsetning til å ha fast trykk ut av reduksjonsventilen, der trykket på nettet øker når forbruket er lavt.

Etter noen dager med nattsenkning, ble det forsøkt å styre trykket ut fra reduksjonsventilen ved bruk av i2O sin algoritme. Dette førte til at trykket ble redusert, men ikke ned til ønsket trykk på 42 m på dagtid og 37m på natt, som vist i figur 4.13 er trykket på rundt 46 m på dagtid og 42 m om natten. En årsak til dette kan være at i2O trenger tid til å lære seg sammenhengen mellom trykk og forbruk og å senke trykket til ønsket nivå. Perioden systemet har virket er kanskje ikke lang nok til å oppnå dette. Trykket ved kritisk node er likevel jevnere enn hva det var før, og lite variasjon i trykk er et av målene med systemet.

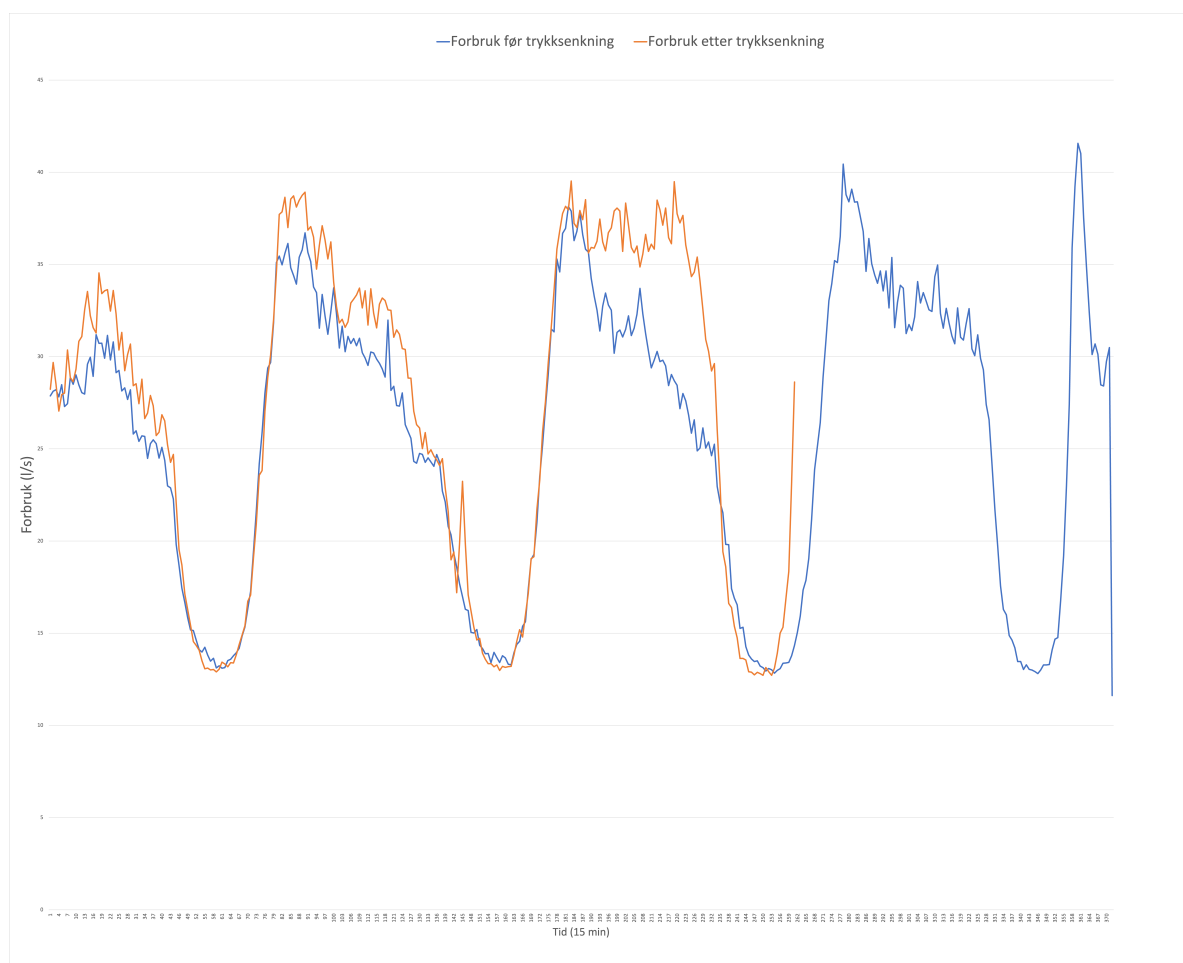
Forbruket har økt litt etter implementeringen av i2O, slik som vist i figur 4.14 (oransje). Dette er ikke som forventet, men det kan være en forskjell mellom faktorer som for eksempel været (som kan resultere i mer hagevanning, bilvasking etc.) i referanseperioden og i perioden med trykkstyring med i2O. Referanseperioden er 28.04.2023-02.05.2023 og perioden med i2O er 12.05.2023-15.05.2023. Disse periodene viser begge forbruk på fridager og er derfor sammenlignbare.



Figur 4.12: Trykk ved kritisk node før og etter nattsenkning



Figur 4.13: Trykk ved kritisk node før og etter i2O



**Figur 4.14:** Forbruk før og etter i2O

### 4.7.1 Nåverdiberegning for i2O

Selv om resultatene fra i2O-systemet ikke viser noen reduksjon i forbruk, kan det være interessant å gjøre en nåverdiberegning for å se i hvor stor grad systemet hadde vært lønnsomt dersom man oppnådde samme reduksjon som i den hydrauliske modellen. Det legges til grunn at systemet har en N1-verdi på 1 og at strømprisen er på 1 NOK/kWt.

#### Kostnader for i2O

i2O har følgende kostnader ifølge Bergen kommune:

- Investering: 50 000 NOK per sone
- Servicegebyr/år=2500 NOK

Investeringskostnaden er kostnaden for utstyr, altså logger, kontroll og aktuator for å styre en trykkreduksjonsventil. Systemet har en levetid på 10-15 år.

**Tabell 4.8:** Potensielle besparelser ved i2O

Marginalkostnader forsyningsvann SO14	Totalt
Trykkendring (bar)	0,6
Reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /h)	3,62
Årlig reduksjon lekkasje (m <sup>3</sup> /år)	31711
Kostnader vannbehandling	
VBA Svartediket	
Kjemikalier	NOK 1 520 911,00
Energi	NOK 4 216 417,00
VBA Espeland	
Kjemikalier	NOK 1 286 655,00
Energi	NOK 794 184,00
Total for behandling	NOK 3 909 083,50
Kostnader avløpsrensing	
Flesland RA	
Energi	NOK 3 643 543,00
Kjemikalier	NOK 1 009 941,00
50% innlekket vann	NOK 72 643,19
Totalt volum vann inn i sone (m <sup>3</sup> )	813683
Kostnad per kubikkmeter vann (kr/m <sup>3</sup> )	NOK 4,89
Årlig besparelse ved trykkreduskjon	NOK 155 000

CF= årlig besparelse trykksenkning

$$P = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} \quad (4.2)$$

hvor

- CF<sub>0</sub>=50 000 NOK
- CF=155 000 NOK
- r=4%
- n=10

Nåverdien på investeringen forutsatt at kommunen kan spare 155 000 kr hvert år i en 10-års periode blir da 1 207 189 NOK for denne sonen.

## 5. Diskusjon

I sone SO01 er allerede trykket så lavt ved kritisk node at det er vanskelig å senke trykket mer uten at det blir for lavt. Etter samtaler med Bergen kommune er det mulig å senke trykket ytterligere i denne sonen, men med et lavere trykk vil risikoen for kavitasjon ved pumpa bli høyere. Derfor er det ikke et potensiale for å redusere lekkasjevolumet i sonen ved å benytte en forbruksmodulert kurve for reduksjonsventilen her.

I sone SO14 er det derimot teoretisk mulig å redusere lekkasje ved å benytte forbruksmodulert trykkstyring, og man kan sette ned trykket og redusere lekkasjevolumet uten å få for lavt trykk ved den kritiske noden samtidig som man har betydelig potensiale for sparing.

Hvor mye man kan spare ved å benytte denne typen trykkstyring, avhenger av flere parametre det er knyttet usikkerhet til. Hvor sterk sammenhengen mellom trykk og lekkasje er og hvor mye av lekkasjen som går til avløpsrensing, er usikre parametre. Det er også usikkerhet i forbindelse med strømpriser, og dette vil kunne ha stor innvirkning på de totale besparelsene.

N1-verdi rundt 1 kan være den mest sannsynlige verdien siden ledningsnettene er av ulike typer materiale. Ved en strømpris på 1 kr/kWh vil man da spare 155 000 kr årlig i SO14, og med en levetid på systemet fra i2O på 10 år vil man ha en nåverdi på investeringen på omtrent 1,2 millioner kroner.

En strømpris på 1 kr/kWh kan være et lavt estimat, og ved høye strømpriser videre og dermed høye marginalkostnader på forsyningsvann, vil dette gi enda større besparelser og gjøre trykksenkning til et mer effektivt tiltak. Redusert bruddfrekvens er ikke tatt i betraktning i kostnadsanalysen i denne oppgaven, men et ledningsbrudd kan være kostbart og en reduksjon i antall brudd vil også være økonomisk gunstig for kommunen.

Et alternativ til forbruksmodulert trykkstyring er å sette ned trykket ut fra reduksjonsventilen til et fast trykk lavere enn dagens nivå, ulempen ved dette er at man fremdeles har et høyere trykk enn nødvendig når forbruket i sonen er lavt. Fordelen er derimot at det er enklere å gjennomføre, og uten behov for å gjøre betydelige investeringer.

Resultater fra trykksenkningen ved bruk av i2O samsvarer ikke med resultatene fra modell for SO14. De viser at forbruket ikke reduseres, men økes litt. Dette kan skyldes at det var forskjeller i vær og temperatur i referanseperioden og i perioden med i2O. Dette forklarer likevel ikke at det ikke var noen endring i natt-forbruket. Her var det forventet å se en reduksjon i forbruk på grunn av lavere trykk og dermed lavere lekkasjevolum. Det har vært brudd på ledninger under oppsettet av i2O og driftssituasjoner som har avbrutt loggingen av trykk og forbruk i perioden. En mulig årsak til at forbruket om natten har økt kan være nettopp ledningsbrudd og at det i utgangspunktet var større lekkasjevolum i perioden der i2O virket enn i referanseperioden.

Grunnet den korte perioden i2O har vært tatt i bruk er det vanskelig å kunne svare på hvor store besparelser dette systemet gir, og data for en lengre periode bør samles inn for å kunne vurdere effekten av systemet. Likevel kan systemet føre til lavere og mer stabilt trykk på ledningsnett, som igjen kan føre til at brudd forekommer sjeldnere.



## 6. Konklusjon

Simuleringene i MIKE+ viser et redusert lekkasjenivå ved bruk av forbruksmodulert trykkstyring. Hvor stor reduksjon avhenger av N1-verdien, jo høyere denne verdien er, jo større reduksjoner og besparelser vil man ha av trykksenkning.

En N1-verdi på 1 kan være rimelig å anta, ettersom ledningsnettets består av ulike rørmaterialer. Dette er uansett en verdi med usikkerhet knyttet til seg. Med en strømpris på 1 NOK/kWt og en N1-verdi på 1, vil man ifølge resultatene fra simuleringen i MIKE+ kunne spare omtrent 155 000 NOK per år i SO14.

Det har blitt vurdert ulike verdier for N1 gjennom følsomhetsanalyse, men uten tall fra i2O som kan underbygge resultatene fra den hydrauliske modellen er det vanskelig å bestemme verdien for denne eksponenten.

Resultater fra i2O viser ingen tegn til at lekkasjen har blitt redusert ved å benytte en forbruksmodulert trykkstyring. Trykket har sunket, men ikke ned til ønsket nivå ved kritisk node. Dette kan skyldes kort periode med innsamling av data og at forbruket av ulike grunner kan ha variert i referanse- og måleperiode.

Det har også blitt gjort en nåverdiberegning av investeringen i i2O for å se lønnsomheten av systemet hvis resultatene hadde vært like de fra den hydrauliske modellen. Nåverdien er på 1 207 089 NOK over 10 år. Dette er kun teoretisk, men viser at det kan være betydelig potensiale i et slikt type system.



# Referanser

- Ahopelto, S. og Vahala, R. (2020). Cost–Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks. *Water* 12 (1). DOI: 10.3390/w12010195.
- CF, N., TM, L. og M., S. (2022). Rapportering av data for vannforsyningsystemer i Norge for 2021. I: Folkehelseinstituttet.
- Creaco, E., Walski, T. og ASCE, F. (2017). Economic Analysis of Pressure Control for Leakage and Pipe Burst Reduction.
- Deyi, M., Zyl, J. V. og Shepherd, M. (2014). Applying the FAVAD concept and leakage number to real networks: A case study in Kwadabeka, South Africa. I: bd. 89. Elsevier Ltd: 1537–1544. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.450.
- Flatin, A., Kløve, M. og rokstad, M. (2021). Trykkoptimalisering på vannledningsnettets- beste praksis. I: rapport A263. Norsk Vann.
- Gomes, R., Marques, A. S. og Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal* 8 (2): 65–77. DOI: 10.1080/1573062X.2010.542820.
- Gori, A. (2015). Bergen Vann, i20 system training.
- Greyvenstein, B. og Van Zyl, J. (2007). An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* 56 (2): 117–124.
- Hamilton, S. og McKenzie, R. (2014). *Water management and water loss*. IWA Publishing.
- Haugård, T. (2021). Beregning av kostnad for vannleveranse i sammenheng med trykkreduksjon : en økonomisk casestudie av vannforsyningssystemet til Nordbergsonen, Oslo kommune. Masteroppgave.
- Hoveplan for vannforsyning 2019-2028 (2019). I: Bergen kommune.
- Kabaasha, A. M., van Zyl, J. E. og Piller, O. (2016). Modelling pressure: Leakage response in water distribution systems considering leak area variation. I: *14th CCWI international conference, Computing and Control in Water Industry*: 7–p.
- Lambert, A. (2009). Ten Years Experience in using the UARL Formula to calculate Infrastructure Leakage Index. I: IWA Waterloss 2009 Conference at Cape Town, South Africa on 28-30 April 2009.
- Lambert, A. (sep. 2002). International Report: Water losses management and techniques. *Water Supply* 2 (4): 1–20. DOI: 10.2166/ws.2002.0115.
- Lambert, A., Fantozzi, M. og Shepherd, M. (2017). Pressure: Leak flow rates using FAVAD: An improved fast-track practitioner’s approach. *CCWi2017: Computing and Control in the Water Industry*.

- Lambert, A. og McKenzie, R. (2002). Practical experience in using the Infrastructure Leakage Index. I: *Proceedings of IWA Conference–Leakage Management: A Practical Approach*. Lemesos, Cyprus.
- Liemberger, R. og McKenzie, R. (2005). Accuracy limitations of the ILI: is it an appropriate indicator for developing countries. I: *Conference Proceedings, IWA Leakage 2005 Conference in Halifax, Nova Scotia, Canada*.
- Lindholm, O., Endresen, S., Smith, B. T. og Thorolfsson, S. (2012). Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem. I: rapport A193. Norsk Vann.
- Malm, A., Svensson, G., Røstum, J. og Axell, L. (mar. 2020). Sustainable economic level of leakage in Norway and Sweden – manual of practice. *Water Practice and Technology* 15 (2): 343–349. DOI: 10.2166/wpt.2020.018.
- Malm, A., Svensson, G. og Røstum, J. (2018). Beregning av bærekraftig lekkasjenivå. I: rapport A239. Norsk Vann.
- Pearson, D., Fantozzi, M., Soares, D. og Waldron, T. (2005). Searching for N2: How does pressure reduction reduce burst frequency. I: *Proc. IWA Leakage Conf.* Citeseer: 13.
- Seago, C., McKenzie, R. og Liemberger, R. (2005). International benchmarking of leakage from water reticulation systems. I: *Paper to Leakage 2005 Conference, Halifax*.
- Sivertsen, E. og Bomo, A.-M. (2016). Norske tall for vannforbruk med fokus på husholdningsforbruk. I: rapport B20. Norsk Vann.
- TEK17,§11-17 (2017).
- Thornton, J. og Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. I: *Proceedings of IWA Special Conference'Leakage*.
- Thornton, J., Sturm, R. og Kunkel, G. (2008). *Water loss control*. McGraw-Hill Education: s.20.
- von Scherling, M., Malm, A., Røstum, J. og Svensson, G. (2020). Bærekraftig fremmedvannsandelmodell for utregning av riktig nivå. I: rapport A255. Norsk Vann.
- Winarni, W. (2009). Infrastructure leakage index (ILI) as water losses indicator. *Civil Engineering Dimension* 11 (2): 126–134.